

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

КОВБАСА СЕРГІЙ МИКОЛАЙОВИЧ



УДК 681.5:62-83

**РОЗВИТОК ТЕОРІЇ БЕЗДАВАЧЕВОГО ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМИ СИСТЕМАМИ З АСИНХРОННИМИ
ДВИГУНАМИ**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизації електромеханічних систем та електроприводу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Пересада Сергій Михайлович,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
завідувач кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Чорний Олексій Петрович,
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського,
директор Навчально-наукового інституту електро-механіки, енергозбереження і систем управління;
доктор технічних наук, професор
Щур Ігор Зенонович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
завідувач кафедри електромехатроніки і комп'ютеризованих електромеханічних систем;
доктор технічних наук, професор,
член-кореспондент НАН України
Волков Ігор Володимирович,
Інститут електродинаміки НАН України,
головний науковий співробітник відділу перетворення та стабілізації електромагнітних процесів.

Захист відбудеться «07» квітня 2020 р. о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.20 в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, вул. Борщагівська, 115, корп. 22, ауд. 316.

З дисертацією можна ознайомитися у Науково-технічній бібліотеці ім. Г. І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «03» березня 2020 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

А. І. Замулко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Електромеханічні системи (ЕМС) автоматичного керування різних технологічних призначень споживають більше ніж половину генерованої в світі електричної енергії, перетворюючи її в механічну енергію за допомогою електроприводів різних типів. При цьому частка енергії, що перетворюється за допомогою електроприводів змінного струму, перевищує 90%, з яких більш як 80% належить асинхронним двигунам (АД). Значне поширення асинхронних двигунів зумовлене простотою їх конструкції, низькою вартістю, високою надійністю, а в останні десятиріччя значним розвитком теорії керування цим типом двигунів та засобів силової електроніки.

Постійне зростання загального рівня технологічного розвитку та вимог до якості і вартості продукції, а також стрімкий розвиток електромобільності, ставить перед світовими науковими школами нові задачі для подальшого підвищення якості керування, енергетичної ефективності та надійності електромеханічних систем.

Значний внесок у розвиток методів керування асинхронними двигунами зроблено закордонними та вітчизняними науковцями, такими як: О. В. Садовой, А. О. Лозинський, І. З. Щур, О. П. Чорний, Л. І. Мазуренко, J. Holtz, T. Lipo, P. Vas, D. Novotny, K. Rajashekara, A. Kawamura, K. Matsuse, H. Kubota, M. Kazmierkowski, R. Marino, R. Lorenz, M. Bodson та інші.

Основною метою більшості електроприводів є узгоджене керування координатами технологічних об'єктів з метою забезпечення вимог технологічного процесу. Оскільки показники якості керування координатами електроприводів значною мірою визначають продуктивність устаткування, якість продукції та впливають на показники енерго і ресурсозбереження, то зростаючі вимоги до кінцевої продукції та її собівартості вимагають постійного їх вдосконалення. Враховуючи домінуючу частку асинхронних електроприводів в індустріальному, комунальному, сільськогосподарському та транспортних секторах економіки, принциповим є вирішення проблеми підвищення показників якості керування та енергетичної ефективності електромеханічних систем з асинхронними електродвигунами, які є нелінійними багатовимірними об'єктами з частково вимірюваним вектором стану, що знаходяться під дією координатних та параметричних збурень. Загалом ця задача може вважатися вирішеною для ЕМС з високою точністю керування вихідними координатами (металообробка, робототехніка, системи позиціонування), в яких використовується векторне полеорієнтоване керування на основі інформації про механічні координати електродвигуна. Між тим в найбільш значимих як по кількості, так і по перетворюваній потужності ЕМС технологічних об'єктів з низькими та середніми вимогами до статичних та динамічних показників якості керування координат (турбомеханізми, підйомно-транспортні системи, екструзійне устаткування, прокатне виробництво та ін.) безпосереднє отримання інформації про механічні координати не передбачається або є недоцільним, що обумовлено вимогами надійності, конс-

труктивними особливостями, а при малих потужностях також економічними факторами. Структура системи без давача швидкості (бездавачеві системи) визначає найбільш складну постановку задачі керування об'єктами, в яких повний вектор регульованих координат електромеханічного перетворювача (механічні та електромагнітні координати) не є вимірюваним, тобто в умовах неповної інформації про технологічний об'єкт, частина параметрів якого додатково може бути невизначеною.

Методи керування, що впроваджені в комерційних виробках для цього класу технологічних застосувань, значною мірою не мають строгого теоретичного обґрунтування, а за показниками якості керування координатами електромеханічного перетворювача та технологічного об'єкта не задовольняють вимогам значної кількості технологічних застосувань. Це обумовлює актуальність розвитку та вдосконалення теорії векторного керування електромеханічними системами на основі АД без вимірювання механічних координат, чому і присвячена дана дисертаційна робота.

В роботі розглядається науково-прикладна проблема відпрацювання заданих траєкторій зміни механічних координат електромеханічної системи (моменту, кутової швидкості) та модуля вектора потокозчеплення з одночасним асимптотичним полеорієнтуванням в умовах, коли механічні координати та компоненти вектора потокозчеплення недоступні для вимірювання. Вирішення цієї проблеми в системах бездавачевого керування АД дозволяє задовольнити вимоги більшості технологічних застосувань електромеханічних систем до показників якості керування механічними координатами, використовувати енергетично ефективні алгоритми керування потокозчепленням електромеханічного перетворювача, не впливаючи при цьому на процеси регулювання механічних та технологічних координат електромеханічних систем автоматичного керування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження за темою дисертаційної роботи виконувалися на кафедрі автоматизації електромеханічних систем та електроприводу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за темами, які фінансувалися Міністерством освіти і науки України: «Основи теорії високоефективних систем автоматичного керування складними технологічними об'єктами з векторно-керованими електродвигунами» (№ ДР 0106U002145, 2006 – 2008 рр.), "Основи теорії адаптивних електромеханічних систем автоматичного керування з векторно-керованими електродвигунами змінного струму в умовах неповної інформації" (№ ДР 0109U001826, 2009 – 2011 рр.), «Основи теорії векторно-керованих електромеханічних систем змінного струму з кінематичною парою кочення» (№ ДР 0112U002404, 2012 – 2014 рр.), «Методи робастного адаптивного керування електромеханічними системами з підвищеними динамічними та енергетичними показниками» (№ ДР 0115U000381, 2015 – 2017 рр.), «Розробка енергоефективної електромеханічної системи електробусу на основі адаптивного векторно-керованого асинхронного

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Електромеханічні системи (ЕМС) автоматичного керування різних технологічних призначень споживають більше ніж половину генерованої в світі електричної енергії, перетворюючи її в механічну енергію за допомогою електроприводів різних типів. При цьому частка енергії, що перетворюється за допомогою електроприводів змінного струму, перевищує 90%, з яких більш як 80% належить асинхронним двигунам (АД). Значне поширення асинхронних двигунів зумовлене простотою їх конструкції, низькою вартістю, високою надійністю, а в останні десятиріччя значним розвитком теорії керування цим типом двигунів та засобів силової електроніки.

Постійне зростання загального рівня технологічного розвитку та вимог до якості і вартості продукції, а також стрімкий розвиток електромобільності, ставить перед світовими науковими школами нові задачі для подальшого підвищення якості керування, енергетичної ефективності та надійності електромеханічних систем.

Значний внесок у розвиток методів керування асинхронними двигунами зроблено закордонними та вітчизняними науковцями, такими як: О. В. Садовой, А. О. Лозинський, І. З. Щур, О. П. Чорний, Л. І. Мазуренко, J. Holtz, T. Lipo, P. Vas, D. Novotny, K. Rajashekara, A. Kawamura, K. Matsuse, H. Kubota, M. Kazmierkowski, R. Marino, R. Lorenz, M. Bodson та інші.

Основною метою більшості електроприводів є узгоджене керування координатами технологічних об'єктів з метою забезпечення вимог технологічного процесу. Оскільки показники якості керування координатами електроприводів значною мірою визначають продуктивність устаткування, якість продукції та впливають на показники енерго і ресурсозбереження, то зростаючі вимоги до кінцевої продукції та її собівартості вимагають постійного їх вдосконалення. Враховуючи домінуючу частку асинхронних електроприводів в індустріальному, комунальному, сільськогосподарському та транспортних секторах економіки, принциповим є вирішення проблеми підвищення показників якості керування та енергетичної ефективності електромеханічних систем з асинхронними електродвигунами, які є нелінійними багатовимірними об'єктами з частково вимірюваним вектором стану, що знаходяться під дією координатних та параметричних збурень. Загалом ця задача може вважатися вирішеною для ЕМС з високою точністю керування вихідними координатами (металообробка, робототехніка, системи позиціонування), в яких використовується векторне полеорієнтоване керування на основі інформації про механічні координати електродвигуна. Між тим в найбільш значимих як по кількості, так і по перетворюваній потужності ЕМС технологічних об'єктів з низькими та середніми вимогами до статичних та динамічних показників якості керування координат (турбомеханізми, підйомно-транспортні системи, екструзійне устаткування, прокатне виробництво та ін.) безпосереднє отримання інформації про механічні координати не передбачається або є недоцільним, що обумовлено вимогами надійності, конс-

труктивними особливостями, а при малих потужностях також економічними факторами. Структура системи без давача швидкості (бездавачеві системи) визначає найбільш складну постановку задачі керування об'єктами, в яких повний вектор регульованих координат електромеханічного перетворювача (механічні та електромагнітні координати) не є вимірюваним, тобто в умовах неповної інформації про технологічний об'єкт, частина параметрів якого додатково може бути невизначеною.

Методи керування, що впроваджені в комерційних виробках для цього класу технологічних застосувань, значною мірою не мають строгого теоретичного обґрунтування, а за показниками якості керування координатами електромеханічного перетворювача та технологічного об'єкта не задовольняють вимогам значної кількості технологічних застосувань. Це обумовлює актуальність розвитку та вдосконалення теорії векторного керування електромеханічними системами на основі АД без вимірювання механічних координат, чому і присвячена дана дисертаційна робота.

В роботі розглядається науково-прикладна проблема відпрацювання заданих траєкторій зміни механічних координат електромеханічної системи (моменту, кутової швидкості) та модуля вектора потокозчеплення з одночасним асимптотичним полеорієнтуванням в умовах, коли механічні координати та компоненти вектора потокозчеплення недоступні для вимірювання. Вирішення цієї проблеми в системах бездавачевого керування АД дозволяє задовольнити вимоги більшості технологічних застосувань електромеханічних систем до показників якості керування механічними координатами, використовувати енергетично ефективні алгоритми керування потокозчепленням електромеханічного перетворювача, не впливаючи при цьому на процеси регулювання механічних та технологічних координат електромеханічних систем автоматичного керування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження за темою дисертаційної роботи виконувалися на кафедрі автоматизації електромеханічних систем та електроприводу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за темами, які фінансувалися Міністерством освіти і науки України: «Основи теорії високоефективних систем автоматичного керування складними технологічними об'єктами з векторно-керованими електродвигунами» (№ ДР 0106U002145, 2006 – 2008 рр.), "Основи теорії адаптивних електромеханічних систем автоматичного керування з векторно-керованими електродвигунами змінного струму в умовах неповної інформації" (№ ДР 0109U001826, 2009 – 2011 рр.), «Основи теорії векторно-керованих електромеханічних систем змінного струму з кінематичною парою кочення» (№ ДР 0112U002404, 2012 – 2014 рр.), «Методи робастного адаптивного керування електромеханічними системами з підвищеними динамічними та енергетичними показниками» (№ ДР 0115U000381, 2015 – 2017 рр.), «Розробка енергоефективної електромеханічної системи електробусу на основі адаптивного векторно-керованого асинхронного

електроприводу з акумуляторно-суперконденсаторним живленням» (№ ДР 0117U004284, 2017 – 2018 рр.), а також в рамках виконання госпрозрахункових договорів: «Розробка програмного забезпечення блоку керування дослідного зразка тягового електроприводу та дослідження його характеристик» (№ ДР 01080007544, замовник Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства, м. Київ, 2010 р.), «Розробка системи керування тягового електроприводу трамвайного вагону» (договір № 478 від 01 липня 2016 р., замовник ПрАТ «Запорізький електроапаратний завод»). Частина досліджень виконувалася в рамках міжвузівського співробітництва з Університетом Ноттінгема (Великобританія) за напрямом «Векторне керування координатами асинхронного двигуна з максимізацією відношення момент-струм», а також Університетом прикладних наук Гессена (Німеччина) за напрямом «Системи векторного керування асинхронними двигунами з підвищеними показниками якості керування та енергетичної ефективності». При виконанні науково-дослідних робіт автор розробив нові структури систем векторного керування механічними та електромагнітними координатами асинхронного двигуна, концепцію та метод синтезу бездавачевого векторного керування при прямому полеорієнтуванні, виконав практичну реалізацію та експериментальне тестування розроблених структур керування, керував розробкою, виготовленням та експериментальним тестуванням дослідних зразків електроприводів для промислового впровадження, а також виконував функції відповідального виконавця та керівника проєктів.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розвиток теорії синтезу та аналізу бездавачевих електромеханічних систем з векторно-керованими асинхронними електродвигунами, спрямований на підвищення їх динамічних та статичних характеристик шляхом застосування методів нелінійного та адаптивного керування.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі основні задачі:

- аналіз існуючих методів бездавачевого векторного керування (БВК) координатами асинхронних двигунів, в тому числі реалізованих в серійних електроприводах, з метою визначення їх досяжних показників якості керування та обґрунтування необхідності вирішення науково-прикладної проблеми, що розглядається в роботі;
- аналіз природних властивостей стійкості асинхронного двигуна та розробка методів квазівекторного керування кутовою швидкістю, максимально простих з точки зору практичної реалізації;
- розробка нової концепції векторного керування координатами асинхронних двигунів при неповній інформації про вектор стану;
- розробка нового методу синтезу алгоритмів векторного керування асинхронними двигунами без вимірювання механічних координат;
- розробка методу оцінювання невимірюваних механічних координат АД на основі інформації про струми та напруги статора;

- вирішення основних задач керування координатами електромеханічних систем з асинхронними двигунами на основі розроблених методів синтезу та оцінювання;
- розробка пакету моделюючих програм та дослідження розроблених структур векторного керування методом математичного моделювання;
- створення апаратних та програмних засобів для практичної реалізації систем бездавачевого векторного керування АД;
- проведення експериментальних досліджень та промислове впровадження.

Об'єкт дослідження – процеси керування координатами в електромеханічних системах на основі асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором без вимірювання механічних координат.

Предмет дослідження – методи аналізу та синтезу алгоритмів векторного керування електромеханічними системами на основі асинхронних двигунів без вимірювання механічних координат.

Методи дослідження. Викладені в роботі результати отримані з використанням методів сучасної нелінійної теорії керування таких як: лінеаризація зворотним зв'язком, другий метод Ляпунова, адаптивне керування, теорія сингулярно вироджених систем, а також методів математичного та фізичного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Розроблено нову концепцію прямого векторного керування регульованими координатами асинхронних двигунів: вектором потокозчеплення і кутовою швидкістю в умовах їх невимірюваності, яка є загальнотеоретичною основою для розробки методів синтезу алгоритмів керування і полягає в тому, що за рахунок дії нелінійного керування цілеспрямовано формується декомпозиція вихідної структури електромеханічного об'єкта на три зв'язані підсистеми, властивості стійкості і робастності яких забезпечують композитній системі локальну експоненційну стійкість.

2. Розроблено новий метод синтезу векторних керувань асинхронними машинами без вимірювання механічних координат, які формують композитну структуру у вигляді нелінійно зв'язаних підсистем адаптивного оцінювання кутової швидкості, механічної та електромагнітної з властивостями експоненційної стійкості і ієрархічним розділенням у часі динамічних процесів, що, за умов персистентності збудження, гарантує замкненій композитній системі локальну експоненційну стійкість, завдяки чому вперше забезпечується робастне до неідеальностей інвертора відпрацювання заданих траєкторій кутової швидкості і модуля вектора потокозчеплення з одночасним асимптотичним полеорієнтуванням.

3. Розроблено новий метод розімкненого квазівекторного керування асинхронним двигуном (без вимірювання струмів і кутової швидкості), який за рахунок формування нелінійних компенсуючих складових, синтезованих з використанням другого методу Ляпунова, забезпечує асимптотичне відпрацювання

заданих траєкторій зміни кутової швидкості та модуля вектора потокозчеплення в умовах відсутності навантаження, а також локальну стійкість у навантаженому стані в області, яка визначається параметрами АД.

4. Вперше розроблено метод адаптивного оцінювання сталої або такої, що повільно змінюється, кутової швидкості та потокозчеплень ротора асинхронної машини, який на основі запропонованої форми функції Ляпунова та спеціального перетворення координат дозволяє подолати проблему нелінійної параметризації в рівняннях моделі АД, виходи яких не вимірюються, і завдяки цьому синтезувати адаптивний спостерігач вектора потокозчеплення ротора з властивістю локальної експоненційної асимптотичної стійкості за умов персистентності збудження.

5. Вдосконалено метод прямого полеорієнтованого векторного керування асинхронним генератором шляхом побудови адаптивної системи, яка базується на використанні адаптивного спостерігача потокозчеплення та кутової швидкості ротора по п.4 та нелінійного принципу розділення, завдяки чому вперше забезпечується локальне асимптотичне регулювання напруги в ланці постійного струму, а також відпрацювання модуля вектора потокозчеплення ротора без вимірювання кутової швидкості.

6. Вдосконалено метод бездавачевого векторного керування моментом з максимізацією співвідношення момент-струм шляхом врахування насичення магнітної системи двигуна, а також формування заданого потокозчеплення як динамічної функції моменту, що вперше дозволило забезпечити його асимптотичне відпрацювання як в статиці, так і в динаміці в усьому діапазоні зміни моменту.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розвинуто теорію синтезу систем БВК асинхронними двигунами, що дозволило підвищити показники якості регулювання координат в широкому ряді промислових механізмів, в яких застосовуються різні модифікації частотного керування. В електромеханічних системах середньо -динамічних застосувань реалізовано можливість забезпечення необхідного рівня показників якості регулювання механічних координат без встановлення датчика швидкості, що підвищує їх надійність, зменшує вартість і витрати на обслуговування.

2. Структура алгоритму квазівекторного керування забезпечила можливість формування покращених статичних і динамічних характеристик, а також форсування процесів збудження асинхронної машини при повністю розімкненому керуванні, що дозволило розширити сферу використання розімкнених систем керування асинхронними двигунами.

3. Розроблені алгоритми бездавачевого керування асинхронним генератором дозволили підвищити надійність та знизити вартість систем генерування електричної енергії на їх основі.

4. Алгоритми бездавачевого керування з максимізацією відношення момент-струм та врахуванням кривої намагнічування дозволили створити тягові

електроприводи для електричного транспорту з покращеними енергетичними та динамічними характеристиками.

5. Розроблена технологія швидкого прототипного тестування алгоритмів керування асинхронними двигунами, яка включає в себе пакет моделюючих програм, сімейство контролерів на основі цифрових сигнальних процесорів (TMS320F28335, TMS320F28069) та програмне забезпечення для них, а також ряд експериментальних стендів з асинхронними двигунами в діапазоні потужностей від 0.75 до 50 кВт, дозволяє виконувати практичну реалізацію та експериментальні дослідження нових структур керування в лабораторних умовах в терміни, які співрозмірні з термінами проведення математичного моделювання.

6. Розроблено, виготовлено та експериментально протестовано ряд систем БВК потужністю до 240 кВт, в тому числі три дослідні зразки тягового електроприводу з покращеними динамічними та енергетичними характеристиками для використання в тролейбусах, трамваях та електробусах.

7. Результати роботи впроваджено: в серійних загальнопромислових асинхронних електроприводах потужністю від 15 до 100 кВт виробництва ТОВ «Енергоресурс», м. Львів; в дослідному зразку тягового електроприводу для перспективних моделей тролейбусів та трамвайних вагонів в ДП «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства», м. Київ; в дослідному зразку тягового електроприводу трамвайного вагона потужністю 180 кВт виробництва ПрАТ «Запорізький електроапаратний завод», м. Запоріжжя; в учбовий процес в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» при викладанні дисциплін «Моделювання електромеханічних систем», «Електромеханічні системи електричних транспортних засобів», «Цифрова обробка сигналів в електромеханічних системах».

Особистий внесок здобувача. Дисертація є самостійно виконаною науковою роботою, в якій викладено авторський підхід до розробки концепції прямого векторного керування координатами асинхронних двигунів в умовах неповної інформації. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать: в роботах [1 – 3], [11], [31], [35], [60] автором розроблено концепцію прямого векторного керування координатами асинхронних двигунів без вимірювання механічних координат, розроблено метод синтезу, а також алгоритми БВК кутовою швидкістю, моментом та модулем вектора потокозчеплення; в [4], [15], [27], [36], [38 – 40], [51 – 53] доведено властивості стійкості адаптивних спостерігачів невідомих параметрів асинхронного двигуна для систем бездавачового керування; в [5], [9], [12 – 14], [21], [24], [30], [45], [54], [57], [58], [62], [63] обґрунтовано властивості стійкості структур векторного керування координатами електромеханічних систем; в [6], [7], [28], [48], [55], [56], [61] розроблено алгоритми векторного керування координатами асинхронного двигуна з максимізацією момент-струм, методи формування заданого потокозчеплення в функції моменту двигуна, методики проведення експериментальних дослі-

джень; в [8], [17], [19], [22] виконано аналіз властивостей систем векторного керування, які синтезовано в різних системах координат; в [10], [16], [18], [20], [23], [25], [26], [29], [37], [38], [43], [44], [46], [47], [59], [64] розроблено програмно-апаратні засоби практичної реалізації, експериментальні установки та методики проведення експериментального тестування систем векторного керування; в [32 – 34], [42] – розроблено структури векторного керування без вимірювання статорних струмів; в [49], [50] – розроблено методики дослідження та виконано аналіз впливу нелінійності магнітного кола асинхронного двигуна на процеси керування.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на міжнародних науково-технічних конференціях: «39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society», IECON-2013 (Viena, Austria, 2013), «IEEE International Symposium on Industrial Electronics», ISIE-2014 (Istanbul, Turkey, 2014), «IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles, ESARS-2015», (Aachen, Germany, 2015), «Combined Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference», ESARS-IETEC (Toulouse, France, 2016, Nottingham, UK, 2018), «International Conference on Intelligent Energy and Power Systems», IEPS (Kyiv, Ukraine, 2014, 2016), «IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering», UKRCON (Kyiv, Ukraine, 2017), «Modern electrical and energy systems», «IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology», ELNANO (Kyiv, Ukraine, 2019), MEES-2017 (Kremenchuk, Ukraine, 2017), «IEEE 6th International conference on Energy Smart Systems» (Kyiv, Ukraine, 2019), International workshop Advanced Control in Power Systems and Drives (Friedberg, Germany, 2016, 2017, 2018), «Проблеми сучасної електротехніки» (Київ, 2006, 2014, 2018, Вінниця 2012), «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» (Харків, 2005, 2007 – 2013, 2017), «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика» (Кременчук, 2007 – 2013, 2015), «Інтелектуальні енергетичні системи» (Київ, 2017), «Оптимальне керування електроустановками» (Вінниця, 2011, 2013, 2015, 2017).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 64 наукові праці, у тому числі 1 монографія, 49 статей у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття у виданнях іноземних держав, 9 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 14 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із змісту, переліку умовних скорочень, вступу, 6 розділів, висновків, списку використаної літератури із 238 найменувань та 3 додатків. Загальний обсяг роботи становить 435 сторінок, у тому числі 290 сторінок основного тексту, 184 рисунки та 4 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету та задачі наукових досліджень, наведено дані про зв'язок роботи з науковими програмами, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено дані про їх апробацію, публікацію та впровадження.

У першому розділі виконано аналітичний огляд існуючих методів бездавачевого керування та оцінювання невимірюваних координат. З аналізу наукових праць, які опубліковано за останні 30 років в провідних закордонних виданнях, а також у фахових виданнях України, встановлено, що результати досліджень, виконаних в основних світових наукових школах керування в електромеханічних системах (роботи Н. Kubota, R. Marino, P. Vas, G. Asher, T. Matsuse, J. Holtz, K. Rajashekar, В. Уткіна та інших), започаткували створення теоретичних основ бездавачевого керування асинхронними двигунами. Основні напрямки наукових досліджень в області бездавачевого керування АД полягають у використанні неідеальностей асинхронної машини зі збудженням основною гармонікою або інжекцією вищих складових, використанні фільтрації Калмана, а також методів теорії адаптивного керування. Разом з тим більшість запропонованих методів бездавачевого керування базуються на припущеннях, які не задовольняються на практиці, вони вирішують лише часткові задачі і не створюють цілісної теорії. Це зумовлено як складністю задач керування при відсутності інформації про механічні координати електричної машини, так і, значною мірою, недостатньою розробленістю загальних методів нелінійного керування для класу об'єктів, що розглядається.

Для визначення реальних динамічних та статичних показників якості в існуючих системах бездавачевого керування в першому розділі представлено результати порівняльного експериментального тестування серійних перетворювачів частоти основних світових виробників, які присутні на ринку України.

З результатів аналітичного огляду та експериментального тестування встановлено, що більшість алгоритмів практичного спрямування, в тому числі і такі, що реалізовані у комерційних виробках світових виробників, не мають строгого теоретичного обґрунтування, або можуть лише умовно називатися такими, тому що вони базуються на суттєвих спрощеннях, таких як лінеаризація, розгляд тільки усталених режимів роботи двигуна, або вміщують операції, що не можуть бути надійно реалізовані на практиці (розімкнене інтегрування, ідеальне диференціювання). Як результат такого підходу, існуючі системи БВК не забезпечують асимптотичного регулювання кутової швидкості і модуля вектора потокозчеплення, мають обмежений діапазон керування, можуть втрачати стійкість при роботі на малих швидкостях, а також в генераторному режимі, мають значну чутливість до варіацій параметрів електричної машини. В сукупності ці фактори призводять до того, що існуючі методи бездавачевого керування не в змозі задовольнити вимоги значної кількості технологічних застосувань.

Таким чином встановлено, що загальнотеоретична проблема бездавачевого керування асинхронним двигуном не має визначеного теоретичного вирішення в умовах наступних реалістичних припущень: використовується модель повного порядку; вектор потокозчеплення не вимірюється та не оцінюється шляхом розімкненого інтегрування; бездавачевий алгоритм базується на інформації лише про струми статора, операція диференціювання струму не використовується; момент навантаження обмежений, постійний та невідомий; заміна оціненої кутової швидкості на вимірювану дає можливість формувати локальне експоненційне рішення; процедура налаштування алгоритму має бути прозорою і легко корельованою з показниками якості керування.

У другому розділі для технологічних об'єктів, в яких використовується розімкнене частотне керування, запропоновано методи квазівекторного керування координатами АД, які дозволяють синтезувати максимально прості з точки зору практичної реалізації алгоритми керування кутовою швидкістю і модулем вектора потокозчеплення статора АД та забезпечити покращення статичних і динамічних характеристик регулювання кутової швидкості.

В роботі розглядаються динамічні моделі АД, загальна форма яких має вигляд

$$\dot{\omega} = (M - M_c)/J, \quad (1)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_{em} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_{IM}, \omega_0) + \mathbf{B}\mathbf{u}, \quad (2)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x}, \quad \mathbf{y}_1 = \mathbf{h}(\mathbf{x}), \quad M = h_m(\mathbf{x}_{em}),$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0; \quad \varepsilon_0(t_0) = 0,$$

де $\mathbf{x}_{IM} = (\omega, \mathbf{x}_{em}^T)^T$, $\mathbf{x}_{em} \in \mathbb{R}^4$ – вектор електричних змінних; ω – кутова швидкість ротора; M – електромагнітний момент; M_c – момент навантаження; $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^r$, $r \leq 5$ – вектор вимірюваних змінних; $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^2$ – вектор керувань, визначений компонентами вектора напруги статора $\mathbf{u} = (u_{1d}, u_{1q})^T$; $\mathbf{y}_1 \in \mathbb{R}^2$ – вектор регульованих координат; $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ – вектор-функція виходу; $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{4 \times 2}$ – постійна матриця відповідного розміру, ε_0, ω_0 – кутове положення та кутова швидкість рухомої системи координат $(d-q)$ відносно стаціонарної $(a-b)$; J – сумарний момент інерції.

Перетворення змінних між системами координат $(a-b)$ та $(d-q)$ здійснюється з використанням виразів

$$\mathbf{x}^{(d-q)} = e^{-\mathbf{J}\varepsilon_0} \mathbf{x}^{(a-b)}, \quad \mathbf{x}^{(a-b)} = e^{\mathbf{J}\varepsilon_0} \mathbf{x}^{(d-q)}, \quad e^{-\mathbf{J}\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & \sin \varepsilon_0 \\ -\sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де $\mathbf{x}^{(y-z)}$ – визначає двовірні вектори струмів, напруг та потокозчеплень.

Без втрати загальності, при розгляді математичних моделей АД прийнято одну пару полюсів.

Для розробки методу квазівекторного керування використано динамічну модель АД (1), (2), в якій $\mathbf{x}_{em} = (i_{2d}, i_{2q}, \psi_{1d}, \psi_{1q})^T$, $h_m(\mathbf{x}_{em}) = \mu_s(\psi_{1q}i_{2d} - \psi_{1d}i_{2q})$, $\mathbf{y}_1 = (\omega, |\psi_1|)^T$,

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, \omega_0) = \begin{bmatrix} -\gamma_1 i_{2d} + (\omega_0 - \omega) i_{2q} + \alpha_1 \beta_1 \psi_{1d} - \beta_1 \omega \psi_{1q} \\ -\gamma_1 i_{2q} - (\omega_0 - \omega) i_{2d} + \alpha_1 \beta_1 \psi_{1q} + \beta_1 \omega \psi_{1d} \\ -\alpha_1 \psi_{1d} + \omega_0 \psi_{1q} + \alpha_1 L_m i_{2d} \\ -\alpha_1 \psi_{1q} - \omega_0 \psi_{1d} + \alpha_1 L_m i_{2q} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\beta_1 & 0 \\ 0 & -\beta_1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де (i_{2d}, i_{2q}) , (ψ_{1d}, ψ_{1q}) – компоненти векторів струму ротора та вектора потокозчеплення статора, $\alpha_1 = R_1 / L_1$, $\beta_1 = L_m^{-1}(\sigma_1 L_1)$, $\gamma_1 = R_2 / \sigma_1 + \alpha_1 \beta_1 L_m$, $\sigma_1 = L_1 - L_m^2 / L_2$, $\mu_s = 1.5 L_m / L_1 J$, R_1, R_2 , L_1 , L_2 – активні опори та індуктивності статора і ротора відповідно, L_m – індуктивність намагнічуючого контуру.

В загальній постановці задачі квазівекторного керування об'єктом (1), (2), (4) необхідно сформулювати регулятор

$$\mathbf{u} = \Phi_1(\mathbf{y}_1^*), \quad (5)$$

де $\mathbf{y}_1^* = (\omega, \psi_1^*)$ – вектор завдань, який за умови відсутності навантаження забезпечить асимптотичне регулювання (відпрацювання) вектора \mathbf{y}_1 при одночасній орієнтації керування за вектором потокозчеплення статора ψ_1 .

Запропонований метод квазівекторного керування базується на природних властивостях стійкості АД, не передбачає вимірювання координат електро механічного перетворювача і при дії керування (5) формує декомпозицію вихідної моделі АД (1), (2) на нелінійно зв'язані електричну та механічну підсистеми. Застосування векторного підходу до синтезу повністю розімкненого керування дозволило сформулювати окремі канали регулювання потокозчеплення статора та кутової швидкості і, як наслідок, надало можливість впливати на статичні та динамічні характеристики електро механічної системи шляхом формування заданого потокозчеплення статора.

При вирішенні задачі регулювання модуля вектора потокозчеплення статора та кутової швидкості, алгоритм квазівекторного керування записується у наступному вигляді:

$$u_{1a} = \alpha_1 \psi_1^* \cos(\varepsilon_0) - \omega_0 \psi_1^* \sin(\varepsilon_0), u_{1b} = \alpha_1 \psi_1^* \sin(\varepsilon_0) + \omega_0 \psi_1^* \cos(\varepsilon_0), \dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 = \omega^*. \quad (6)$$

де $\alpha_1 = R_1 / L_1$, R_1 і L_1 – активний опір та індуктивність статора відповідно.

В роботі показано, що при дії керування (6) лінеаризована у початку координат динаміка похибок відпрацювання координат електричної підсистеми та кутової швидкості може бути представлена у формі

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_1 &= \mathbf{A}(t) \mathbf{x}_1 + \mathbf{\Gamma}^T \mathbf{z}, \\ \dot{\mathbf{z}} &= -\mu_s \mathbf{\Gamma} \mathbf{P} \mathbf{x}_1, \end{aligned} \quad (7)$$

де \mathbf{x}_1 – вектор похибок відпрацювання електричних координат, $\mathbf{z} = \tilde{\omega}$, $\tilde{\omega} = \omega - \omega^*$ – похибка відпрацювання кутової швидкості; $\mathbf{P} = \text{diag}(L_m^{-1}, L_m^{-1}, \beta_1^{-1}, \beta_1^{-1})$.

Показано, що оскільки матриця $\mathbf{A}(t)$ відповідає вимогам Гурвіця при виконанні сформульованих у роботі умов обмеженості заданої швидкості [32], $\mathbf{\Gamma}(t) = \text{const}$, то положення рівноваги $(\mathbf{x}_1, \tilde{\omega}) = 0$ лінеаризованої системи (7), а отже і вихідної нелінійної динаміки похибок відпрацювання координат при $M_c = 0$, буде локально експоненційно стійким. З практичної точки зору це означає, що при $M_c = 0$ в системі гарантується асимптотичність регулювання положення рівноваги $\omega_0 = \omega^* = \omega$ з підтриманням постійного значення модуля вектора потокозчеплення $|\psi_1| = \psi_1^*$ при одночасному досягненні умови орієнтації за вектором потокозчеплення статора $\psi_{1q} = 0$. При $M_c \neq 0$ асимптотичність регулювання координат порушується, при цьому система залишається локально стійкою при дії обмеженого збурення M_c , а її статичні властивості відносно збурення визначаються параметрами АД.

Використання запропонованого методу квазівекторного керування дозволило досягти покращення динамічних та статичних характеристик електромеханічних систем при повністю розімкненому керуванні за рахунок спеціального формування заданого потокозчеплення в функції заданої кутової швидкості, а також забезпечити форсування процесів збудження АД.

Для ЕМС з підвищеними вимогами до динамічних показників якості керування в розділі розроблено модифікований метод квазівекторного керування, який за умов $M_c = 0$ забезпечує асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій кутової швидкості та модуля вектора потокозчеплення.

Ефективність запропонованих методів квазівекторного керування підтверджено результатами експериментальних досліджень [33].

У **третьому розділі** запропоновано *концепцію* прямого векторного керування координатами асинхронних двигунів без вимірювання механічних координат та розроблено *метод* синтезу нелінійних керувань, які забезпечують її реалізацію.

Для формалізації концепції керування розглянуто модель АД у формі (1), (2),

в якій $\mathbf{x}_{em} = (i_{1d}, i_{1q}, \psi_{2d}, \psi_{2q})^T$, $h_m(\mathbf{x}_{em}) = \mu_1 (\psi_{2d} i_{1q} - \psi_{2q} i_{1d})$, $\mathbf{y}_1 = (\omega, |\psi_2|)^T$, $\mathbf{y} = (i_{1d}, i_{1q})^T$,

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, \omega_0) = \begin{bmatrix} -\gamma i_{1d} + \omega_0 i_{1q} + \alpha \beta \psi_{2d} + \beta \omega \psi_{2q} \\ -\gamma i_{1q} - \omega_0 i_{1d} + \alpha \beta \psi_{2q} - \beta \omega \psi_{2d} \\ -\alpha \psi_{2d} + (\omega_0 - \omega) \psi_{2q} + \alpha L_m i_{1d} \\ -\alpha \psi_{2q} - (\omega_0 - \omega) \psi_{2d} + \alpha L_m i_{1q} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \sigma^{-1} & 0 \\ 0 & \sigma^{-1} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

де (i_{1d}, i_{1q}) , (ψ_{2d}, ψ_{2q}) – компоненти векторів струму статора та вектора потокозчеплення ротора, $\alpha = R_2/L_2$, $\beta = L_m/\sigma L_2$, $\gamma = R_1/\sigma + \alpha \beta L_m$, $\sigma = L_1 - L_m^2/L_2$, $\mu_1 = 3L_m/2L_2$.

В загальній постановці задачі бездавачевого керування дві вихідні координати АД, які визначені вектором \mathbf{y}_1 , мають керуватися з використанням двовірного вектора напруги статора, що формується нелінійним динамічним контролером

$$\mathbf{u} = \boldsymbol{\varphi}_1(\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_1^*, \mathbf{v}, \hat{\mathbf{p}}, \boldsymbol{\lambda}), \quad \dot{\mathbf{v}} = \boldsymbol{\varphi}_2(\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_1^*, \mathbf{v}, \hat{\mathbf{p}}, \boldsymbol{\lambda}), \quad \mathbf{v} \in \mathbb{R}^v, \quad (9)$$

на основі інформації про вектор вимірюваних змінних стану \mathbf{y}_1 , де $\mathbf{y}_1^* = (\omega^*, \psi^* > 0)^T$ – вектор завдань, в якому ω^* і ψ^* є заданими траєкторіями для змінних ω і $|\psi_2|$ відповідно, $\hat{\mathbf{p}}$ – вектор параметрів електромеханічного перетворювача, $\boldsymbol{\lambda}$ – вектор параметрів налаштування.

За умови виконання припущень про те, що $\hat{\mathbf{p}} = \text{const}$, $\mathbf{M}_c = \text{const}$ є обмеженим але невідомим, задані траєкторії зміни кутової швидкості та модуля вектора потокозчеплення ω^* , ψ^* є обмеженими функціями з відомими першими та другими похідними за часом, нелінійний контролер (9) має забезпечувати досягнення наступних цілей керування:

О.1. Локальне асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій кутової швидкості та модуля вектора потокозчеплення, тобто $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\omega} = 0$, $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi} = 0$, при обмеженості всіх внутрішніх сигналів.

О.2. Асимптотичну орієнтацію за вектором потокозчеплення ротора $\lim_{t \rightarrow \infty} \psi_{2q} = 0$.

О.3. Асимптотичне оцінювання кутової швидкості, тобто виконання умови $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\omega} = 0$, де $\tilde{\psi} = |\psi_2| - \psi^*$, $\tilde{\omega} = \omega - \hat{\omega}$ – похибка оцінювання кутової швидкості, $\hat{\omega}$ – оцінена кутова швидкість.

О.4. Можливість формування динамічних показників якості відпрацювання координат шляхом впливу на вектор параметрів налаштування $\boldsymbol{\lambda}$.

Запропонована *концепція керування* передбачає виконання наступних кроків: знаходження загальних структур нелінійних систем, які формуються при дії керування (9) та включають в себе три зв'язані підсистеми – електромагнітну, оцінювання кутової швидкості, механічну (див. рис. 1), та гарантують досягнення цілей О.1 – О.4; розробку методу синтезу прямого векторного керування, який формує такі структури для АД, а також синтез алгоритму прямого векторного керування та формування процедур налаштування і обмеження координат.

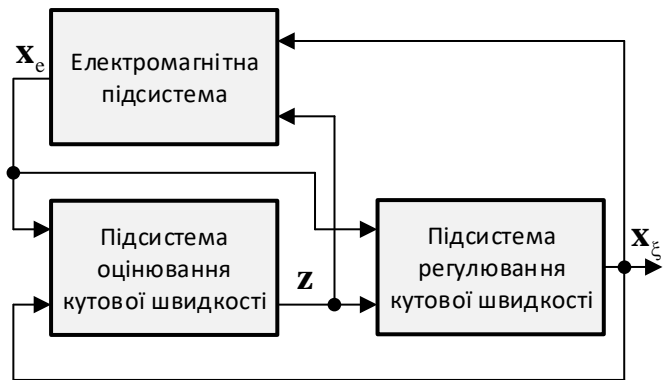


Рис. 1. Результуюча декомпозиція похибок оцінювання та керування

Запропонована концепція керування ґрунтується на розвитку результату по стійкості композитних систем (М. Montanari, S. Peresada 2006) який формалізується у вигляді наступного твердження.

Твердження 1. Якщо динамічна модель (1), (2), (8) при дії регулятора (9) може бути представлена в вигляді наступної форми:

$$\dot{\mathbf{x}}_\xi = \mathbf{A}_\xi \mathbf{x}_\xi + \mathbf{B}_{\xi 1}(t, \mathbf{x}_e) \mathbf{x}_\xi + \mathbf{B}_{\xi 2}(t) \mathbf{x}_e + \mathbf{B}_{\xi 3}(t, \mathbf{x}_e) \mathbf{x}_e + \mathbf{B}_{\xi 4}(t, \mathbf{x}_e) \mathbf{z}, \quad (10)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_e = \mathbf{A}_e(t) \mathbf{x}_e + \mathbf{B}_{e1}(t, \mathbf{x}_\xi, \mathbf{x}_e) \mathbf{x}_e + \mathbf{B}_{e2}(t, \mathbf{x}_e) \mathbf{z}, \quad (11)$$

$$\varepsilon \dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}_z \mathbf{z} + \varepsilon \mathbf{B}_{z1}(t, \mathbf{x}_\xi, \mathbf{x}_e, \mathbf{z}). \quad (12)$$

де змінні стану $\mathbf{x}_e(t) \in \mathbf{B}_e$, $\mathbf{x}_\xi(t) \in \mathbf{B}_\xi$, $\mathbf{z}(t) \in \mathbf{B}_z \quad \forall t \geq 0$, $\mathbf{B}_e = \{\mathbf{x} : \|\mathbf{x}\| < b_e\}$, $\mathbf{B}_\xi = \{\mathbf{x} : \|\mathbf{x}\| < b_\xi\}$, $\mathbf{B}_z = \{\mathbf{z} : \|\mathbf{z}\| < b_z\}$, $\varepsilon \in [0, 1)$ – малий додатний параметр, то положення рівноваги системи (10) - (12) $\mathbf{x}_\xi = 0$, $\mathbf{x}_e = 0$, $\mathbf{z} = 0$ є локально експоненційно стійким, якщо виконуються наступні умови:

P.1. \mathbf{A}_ξ стійка матриця, що задовольняє умовам Гурвіця та рішення рівняння Ляпунова $\mathbf{A}_\xi + \mathbf{A}_\xi^T = -k_\omega \mathbf{I}_2$, $k_\omega > 0$, $\mathbf{I}_2 = \text{diag}[1, 1]$.

P.2. $\|\mathbf{B}_{\xi 1}(t, \mathbf{x}_e) \mathbf{x}_\xi\| \leq k_\omega k_1 \|\mathbf{x}_e\| \|\mathbf{x}_\xi\|$ з $0 < k_1 < \infty$, $\forall \mathbf{x}_e \in \mathbf{B}_e$, $\forall \mathbf{x}_\xi \in \mathbf{B}_\xi$, $\forall t \geq 0$.

P.3. $\|\mathbf{B}_{\xi 2}(t)\| \leq k_\omega k_2$ з $0 < k_2 < \infty$, $\forall t \geq 0$.

P.4. $\|\mathbf{B}_{\xi 3}(t, \mathbf{x}_e) \mathbf{x}_e\| \leq k_\omega k_3 \|\mathbf{x}_e\|^2$ з $0 < k_3 < \infty$, $\forall \mathbf{x}_e \in \mathbf{B}_e$, $\forall t \geq 0$.

P.5. Положення рівноваги системи $\dot{\mathbf{x}}_e = \mathbf{A}_e(t) \mathbf{x}_e$ є глобально експоненційно стійким.

P.6. $\|\mathbf{B}_{e1}(t, \mathbf{x}_\xi, \mathbf{x}_e) \mathbf{x}_e\| < k_4 \|\mathbf{x}_e\|^2 + k_5 \|\mathbf{x}_e\| \|\mathbf{x}_\xi\|$ з $0 < (k_4, k_5) < \infty$, $\forall \mathbf{x}_e \in \mathbf{B}_e$, $\forall \mathbf{x}_\xi \in \mathbf{B}_\xi$, $\forall t \geq 0$.

P.7. $\|\mathbf{B}_{\xi 4}(t, \mathbf{x}_e)\| \leq k_\omega k_6$ з $0 < k_6 < \infty$, $\forall \mathbf{x}_e \in \mathbf{B}_e$, $\forall t \geq 0$.

P.8. $\|\mathbf{B}_{e2}(t, \mathbf{x}_e)\| \leq k_8$ з $0 < k_8 < \infty$, $\forall \mathbf{x}_e \in \mathbf{B}_e$, $\forall t \geq 0$.

P.9. \mathbf{A}_z є лінійною матрицею, для якої рівняння Ляпунова $\mathbf{A}_z^T + \mathbf{A}_z = -k_\omega \mathbf{I}_2$ є справедливим.

P.10. $\|\mathbf{B}_{z1}(t, \mathbf{x}_\xi, \mathbf{x}_e, \mathbf{y})\| \leq (k_9 + k'_9 / k_\omega) \|\mathbf{x}_\xi\| + k_{10} \|\mathbf{x}_e\| + (k_{11} + \varepsilon k'_{11} / k_\omega) \|\mathbf{z}\|$ з $0 < (k_9, k'_9, k_{10}, k_{11}, k'_{11}) < \infty$, $\forall \mathbf{x}_\xi \in \mathbf{B}_\xi$, $\forall \mathbf{x}_e \in \mathbf{B}_e$, $\forall \mathbf{z} \in \mathbf{B}_z$, $\forall t \geq 0$.

На основі Твердження 1 розроблено *метод синтезу* бездавачевих керувань в класі прямого полеорієнтування, який полягає в наступному. На першому кроці з використанням теорії адаптивних систем формується спостерігач повного порядку у вигляді

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\psi}} &= -\alpha \hat{\psi} + \alpha L_m \hat{i}_{1d}, \dot{\hat{\varepsilon}}_0 = \omega_0 = \hat{\omega} + \alpha L_m \hat{i}_{1q} / \hat{\psi} + v_\varepsilon, \\ \dot{\hat{i}}_{1d} &= -\gamma \hat{i}_{1d} + \omega_0 \hat{i}_{1q} + \alpha \beta \hat{\psi} + \sigma^{-1} u_{1d} + k_{od} \tilde{\hat{i}}_{1d}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\dot{\hat{i}}_{1q} = -\gamma \hat{i}_{1q} - \omega_0 \hat{i}_{1d} - \beta \hat{\psi} \hat{\omega} + \sigma^{-1} u_{1q} + k_{oq} \tilde{\hat{i}}_q, \dot{e}_\omega = -k_{oi} \tilde{\hat{i}}_q / \beta \hat{\psi}, \hat{\omega} = \omega^* + e_\omega, \quad (14)$$

де $\hat{\psi}$ – модуль оціненого вектора потокозчеплення ротора, $\hat{i}_{1d}, \hat{i}_{1q}$ – оцінки компонент вектора струму статора i_{1d} та i_{1q} відповідно, $\tilde{\hat{i}}_d, \tilde{\hat{i}}_q$ – похибки оцінювання компонент вектора струму статора, v_ε – коригуючий зворотний зв'язок, який формується на подальших кроках синтезу, $e_\omega = \hat{\omega} - \omega^*$ – похибка відпрацювання оціненої кутової швидкості, $(k_{od}, k_{oq}) > 0$ – коефіцієнти спостерігачів струмів по відповідним осям, $k_{oi} > 0$ – коефіцієнт спостерігача кутової швидкості.

На другому кроці з використанням зворотної покрокової процедури проектування синтезуються:

- регулятор оціненого потокозчеплення

$$\dot{i}_{1d}^* = (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^* - k_\psi e_\psi - x_\psi) / \alpha L_m, \dot{x}_\psi = k_{\psi i} e_\psi; \quad (15)$$

- регулятор оціненої кутової швидкості

$$\dot{i}_{1q}^* = (\dot{\omega}^* - k_\omega e_\omega + \hat{M}_c) / \mu \hat{\psi}, \dot{M}_c = -k_{oi} e_\omega; \quad (16)$$

- регулятори струмів статора

$$u_{1d} = \sigma (\gamma \dot{i}_{1d}^* - \omega_0 \dot{i}_{1d}^* - \alpha \beta \hat{\psi} + \dot{i}_{1d}^* - k_{id} \tilde{\hat{i}}_d + x_d), \dot{x}_d = -k_{ii} \tilde{\hat{i}}_d, \quad (17)$$

$$u_{1q} = \sigma (\gamma \dot{i}_{1q}^* + \omega_0 \dot{i}_{1q}^* + \beta \hat{\omega} \hat{\psi} + \dot{i}_{1q}^* - k_{iq} \tilde{\hat{i}}_q + x_q), \dot{x}_q = -k_{ii} \tilde{\hat{i}}_q; \quad (18)$$

де $\dot{i}_{1d}^*, \dot{i}_{1q}^*$ – задані траєкторії зміни польової та моментотворюючої компонент вектора струму статора, $\tilde{\hat{i}}_d = \dot{i}_{1d} - \dot{i}_{1d}^*$, $\tilde{\hat{i}}_q = \dot{i}_{1q} - \dot{i}_{1q}^*$ – похибки відпрацювання струмів по відповідним осям, $e_\psi = \hat{\psi} - \psi^*$ – похибка відпрацювання оціненого потокозчеплення, \hat{M}_c – оцінка константи M_c/J ; $((k_{id}, k_{iq}), k_{ii}) > 0$, $(k_\omega, k_{oi}) > 0$, $(k_\psi, k_{\psi i}) > 0$ – коефіцієнти пропорційних та інтегральних складових регуляторів струмів, кутової швидкості та модуля вектора потокозчеплення відповідно, $\gamma_1 > 0$ – коригуючий коефіцієнт підсистеми регулювання потокозчеплення.

Результуючі рівняння синтезованого алгоритму БВК модулем вектора потокозчеплення та кутовою швидкістю задаються рівняннями (13) – (18) та перетвореннями координат (3), а його структурну схему показано на рис. 2.

Показано, що використання регуляторів струмів (17), (18) з «великими» значеннями коефіцієнтів $((k_{id}, k_{iq}), k_{ii}) \gg 1$ забезпечує виконання умов так званого струмового керування, тобто дозволяє вважати, що $\tilde{\hat{i}}_d = \tilde{\hat{i}}_q = 0$, в той час як регулятор оціненого модуля вектора потокозчеплення (15) забезпечує його асимптотичне відпрацювання так, що $\lim_{t \rightarrow \infty} (x_\psi, e_\psi) = 0$, тобто $\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{\psi} = \psi^*$. При виконанні цих умов

динаміка похибок відпрацювання та оцінювання представляє собою декомпозицію на три зв'язані в замкнутому контурі зворотного зв'язку підсистеми:

механічну

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{M}}_c &= k_{oi} e_\omega, \\ \dot{\tilde{\omega}} &= -k_\omega e_\omega - \tilde{M}_c + \mu \psi^* \tilde{i}_q + \mu (\tilde{\psi}_d i_{1q} - \tilde{\psi}_q i_{1d}),\end{aligned}\quad (19)$$

електромагнітну

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{\psi}}_d &= -\alpha \tilde{\psi}_d + \omega_2 \tilde{\psi}_q, \\ \dot{\tilde{\psi}}_q &= -\alpha \tilde{\psi}_q - \omega_2 \tilde{\psi}_d + \alpha L_m \tilde{i}_q + \psi^* (\tilde{\omega} - e_\omega) - v_\varepsilon, \\ \dot{\tilde{i}}_d &= -k_{od1} \tilde{i}_d + \alpha \beta \tilde{\psi}_d + \beta \omega \tilde{\psi}_q,\end{aligned}\quad (20)$$

оцінювання кутової швидкості

$$\begin{aligned}\dot{e}_\omega &= -k_{oi} \tilde{i}_q / \beta \psi^*, \\ \dot{\tilde{i}}_q &= -k_{oq1} \tilde{i}_q - \beta \psi^* (\tilde{\omega} - e_\omega) + \alpha \beta \tilde{\psi}_q - \beta \omega \tilde{\psi}_d,\end{aligned}\quad (21)$$

де $k_{id1} = \gamma + k_{id}$, $k_{iq1} = \gamma + k_{iq}$, $k_{od1} = \gamma + k_{od}$, $k_{oq1} = \gamma + k_{oq}$.

Для подальшого доведення властивостей стійкості на третьому кроці сформовано коефіцієнти налаштування регуляторів та спостерігачів з метою забезпечення необхідного розділення в часі динамічних властивостей підсистем (19) – (21). Для цього коефіцієнти спостерігача та регулятора швидкості встановлюються у відповідності з виразами: $k_{oi} = k_{oq1}^2/2$, $k_{oi} = k_\omega^2/2$ для $\xi = 0.707$, або $k_{oi} = k_\omega^2/4$ для $\xi = 1$, при цьому $\varepsilon = k_\omega/k_{oq1} \ll 1$.

Сформоване розділення в часі дозволяє представити систему (19) – (21) у стандартній формі сингулярно вироджених систем

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{w}, t, \varepsilon), \\ \varepsilon \dot{\mathbf{w}} &= \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{w}, t, \varepsilon),\end{aligned}\quad (22)$$

де $\mathbf{x} = (\tilde{M}_c, \tilde{\omega}, \tilde{\psi}_d, \tilde{\psi}_q, \tilde{i}_d)^T \in \mathbf{B}_x \subseteq \mathbb{R}^5$ визначає вектор «повільних» змінних, $\mathbf{w} = (w_1, w_2)^T \in \mathbf{B}_w \subseteq \mathbb{R}^2$ – вектор «швидких» змінних, $t \geq 0$, \mathbf{B}_x , \mathbf{B}_w є замкнутими обмеженими підпросторами з центром в початку координат, \mathbf{f} і \mathbf{g} – гладкі обмежені функції, $\mathbf{f}(0, 0, t, \varepsilon) = 0$, $\mathbf{g}(0, 0, t, \varepsilon) = 0 \forall t, \varepsilon$. Система (22) має стандартну форму, оскільки алгебраїчне рівняння $0 = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, t, 0)$ має єдине ізольоване рішення $\bar{\mathbf{w}} = \mathbf{h}(\bar{\mathbf{x}}, t)$. При $\varepsilon = 0$ квазіусталене рівняння для \mathbf{w} знаходиться у вигляді

$$\mathbf{h}(\bar{\mathbf{x}}, t) = \begin{pmatrix} \bar{w}_1 \\ \bar{w}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \alpha \beta \tilde{\psi}_q - \beta \omega \tilde{\psi}_d - \beta \psi^* \tilde{\omega} \end{pmatrix}. \quad (23)$$

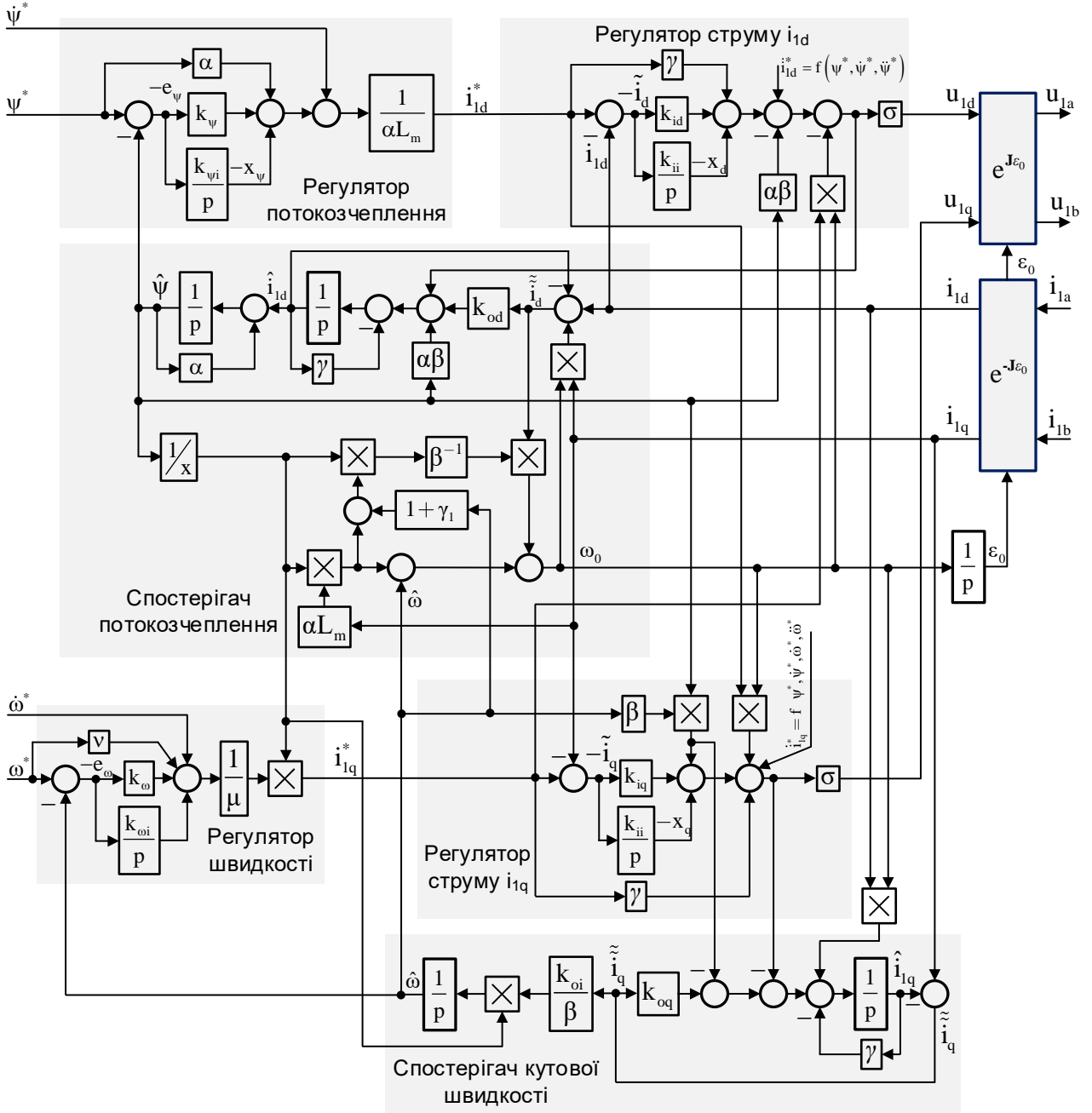


Рис. 2. Структурна схема алгоритму прямого векторного бездавачевого керування модулем вектора потокозчеплення та кутовою швидкістю АД

Визначивши вектор так званих змінних пограничного шару

$$\mathbf{z} = \begin{pmatrix} \zeta_1 \\ \zeta_2 \end{pmatrix} = \mathbf{w} - \mathbf{h}(\bar{\mathbf{x}}, t) = \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 - \alpha\beta\tilde{\psi}_q + \beta\omega\tilde{\psi}_d + \beta\psi^*\tilde{\omega} \end{pmatrix},$$

в розділі показано, що динамічна поведінка системи повного порядку (19) – (21) при достатньо малому ε може бути апроксимованою так званою системою зниженого порядку

$$\dot{\bar{\mathbf{x}}} = \mathbf{f}(\bar{\mathbf{x}}(t), \mathbf{h}(\bar{\mathbf{x}}(t)), t, 0), \bar{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{h}(\bar{\mathbf{x}}(t), t). \quad (24)$$

На останньому кроці доведення стійкості система (24) представляється у формі декомпозиції (10) – (12), для якої доводяться виконання умов Р.1 – Р.10 Твердження 1.

Доведення властивостей експоненційної стійкості електромагнітної підсистеми (20) (умова Р.5 Твердження 1) виконано з використанням другого методу Ляпунова та теорії адаптивних систем. При цьому визначено форму коригуючого зв'язку v_ε у наступному вигляді:

$$v_\varepsilon = (\beta \hat{\psi})^{-1} \left[\hat{\omega}(1 + \gamma_1) + \alpha L_m i_{lq} \hat{\psi}^{-1} \right] \tilde{i}_d. \quad (25)$$

Використання коригуючого зв'язку (25) надає електромагнітній підсистемі властивості локальної експоненційної стійкості за умови виконання умов персистентності збудження, які для розробленої системи визначаються наступним чином: сигнал

$$\Omega = \begin{pmatrix} \Omega_a(t) \\ \Omega_b(t) \end{pmatrix} = e^{J\varepsilon_0^a} \begin{pmatrix} \alpha \\ \omega^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha \cos \varepsilon_0^a - \omega^* \sin \varepsilon_0^a \\ \alpha \sin \varepsilon_0^a + \omega^* \cos \varepsilon_0^a \end{pmatrix} \quad (26)$$

з $\dot{\varepsilon}_0^a = \omega_0^a = \omega^* + \alpha L_m i_q^a / \psi^*$, $i_q^a = \dot{\omega}^* + M_c / J / \mu \psi^*$, є таким, що персистентно збуджує, якщо існують такі додатні константи T , k , які забезпечують виконання умови

$$\int_t^{t+T} \Omega(\tau) \Omega^T(\tau) d\tau \geq k I_2 > 0, \forall t \geq 0. \quad (27)$$

З (26), (27) слідує, що умови персистентності збудження виконуються в усіх сталих режимах за виключенням режиму збудження постійним струмом, який виникає при роботі на низьких швидкостях, коли до валу прикладається генераторний момент навантаження так, що $\omega_0 = \omega + \alpha L_m i_{lq} / |\psi_2| = 0$, а також при нульовій швидкості на холостому ходу.

Дослідження розробленого алгоритму бездавачевого керування, заданого рівняннями (13) – (18) виконано методом математичного моделювання та на експериментальній установці з двигуном потужністю 2.2 кВт (номінальний момент $M_H = 15$ Нм, номінальна швидкість $\omega_H = 150$ рад/с, номінальний струм $I_H = 5$ А). При виконанні дослідження використано послідовність операцій керування АД, яка включає наступні етапи: на інтервалі часу $0 - 0.25$ с відбувається збудження двигуна з використанням заданої траєкторії потокозчеплення; в момент часу $t = 0.5$ с ненавантажений двигун починає відпрацювання заданої траєкторії кутової швидкості, яка починається з нуля і досягає значення 50 рад/с (30 % від номінальної); задану траєкторію кутової швидкості сформовано таким чином, щоб динамічний момент двигуна при її відпрацюванні був близьким до номінального значення; при роботі двигуна з постійною швидкістю в час $t = 1$ с до валу двигуна прикладається, а при $t = 2$ с знімається постійний номінальний момент навантаження. Послідовність операцій керування проілюстровано на рис. 3а.

В розділі методом математичного моделювання та експериментально показано, що розроблений алгоритм бездавачевого керування забезпечує асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій модуля вектора потокозчеплення та кутової швидкості, асимптотичне оцінювання модуля вектора потокозчеплення ротора і кутової швидкості, а також асимптотичне полеорієнтування.

Графіки моментоутворюючої компоненти струму статора та похибки відпрацювання кутової швидкості при виконанні тесту розробленою системою бездавачевого керування показано на рис. 3б (математичне моделювання) та на рис. 3в (експеримент). На рис. 3г для порівняння представлено графіки перехідних процесів в системі векторного керування з вимірюванням кутової швидкості. На рис. 4 проілюстровано відпрацювання нульової швидкості в системі бездавачевого керування та в системі з вимірюванням кутової швидкості.

З представлених на рис. 3, 4 графіків встановлюємо, що динамічні та статичні показники якості відпрацювання кутової швидкості в розробленій системі бездавачевого керування наближаються до існуючих в системах з вимірюванням кутової швидкості. Результати експериментальних досліджень, які наведено на рис. 3в, значною мірою повторюють результати математичного моделювання, рис. 3б. Розроблений алгоритм БВК забезпечує стійку роботу на нульовій швидкості. Експериментально встановлено, що розроблена система БВК забезпечує діапазон регулювання кутової швидкості на рівні 1:100 і вище.

Для порівняння досягнутих показників якості керування з існуючими у виробках провідних закордонних виробників на рис. 5 показано перехідні процеси при компенсації стрибкоподібного постійного номінального моменту навантаження в системі з розробленим алгоритмом та в системі бездавачевого керування на основі серійного перетворювача одного з провідних світових виробників. З рис. 5 можна зробити висновок, що досягнуті в розробленій системі бездавачевого керування показники якості керування не поступаються існуючим в електроприводах провідних закордонних виробників показникам.

Результати експериментального тестування розробленого алгоритму бездавачевого керування з двигунами потужністю 0.75 кВт та 5.5 кВт, які представлено в розділі, також підтвердили високий рівень досяжних показників якості керування, що додатково підтверджує достовірність теоретичних висновків та можливість масштабування розробленої системи БВК на двигуни різної потужності.

Рішення, яке отримано для випадку керування кутовою швидкістю, розповсюджено на випадок керування моментом АД шляхом заміни регулятора кутової швидкості (16) на регулятор моменту у наступному вигляді:

$$i_{1q}^* = \frac{M^*}{\mu_1 \hat{\psi}}, \quad \hat{\psi} > 0, \quad (28)$$

де M^* – заданий момент АД.

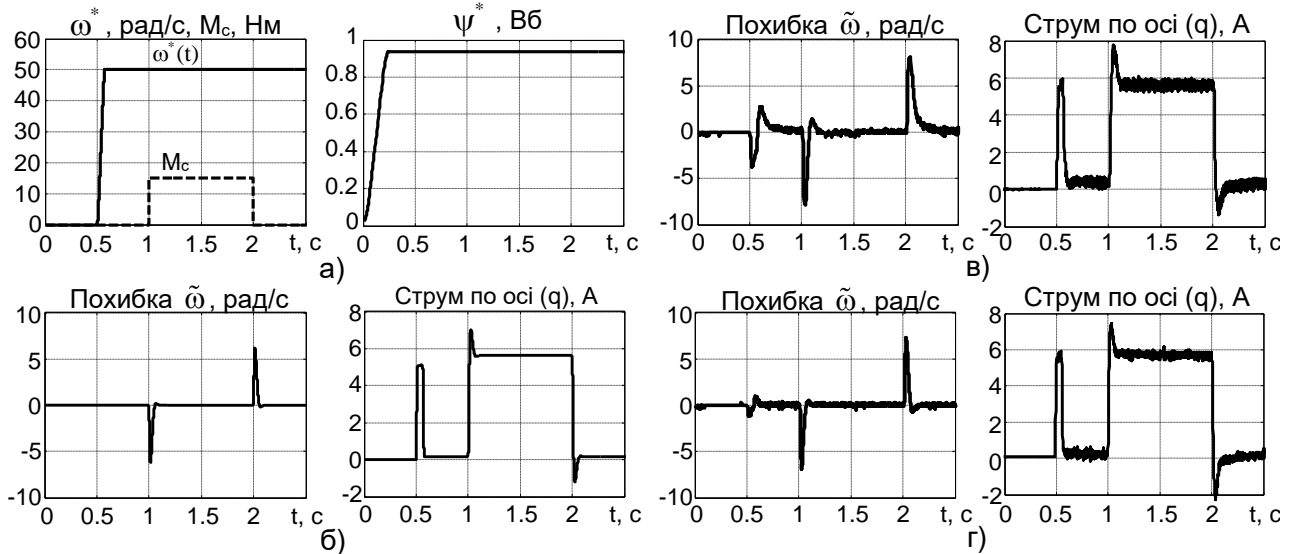


Рис. 3. Перехідні процеси при відпрацюванні заданої траєкторії кутової швидкості: а) послідовність операцій керування; б) результати математичного моделювання; в) результати експерименту; г) результати експерименту в системі з давачем швидкості

Методом математичного моделювання та експериментально показано, що розроблена система БВК моментом забезпечує асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій моменту та модуля вектора потокозчеплення при одночасній асимптотичній орієнтації за вектором потокозчеплення ротора. Результати математичного моделювання співпадають з результатами експериментальних досліджень.

Отримані результати по синтезу алгоритму бездавачевого керування моментом АД розповсюджено на випадок статорного полеорієнтування.

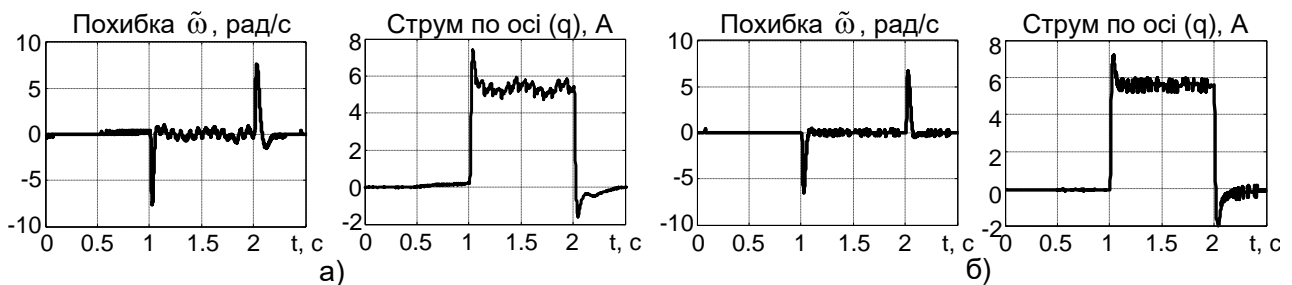


Рис. 4. Експериментальні перехідні процеси при відпрацюванні нульової швидкості: а) система бездавачевого керування; б) система з давачем швидкості

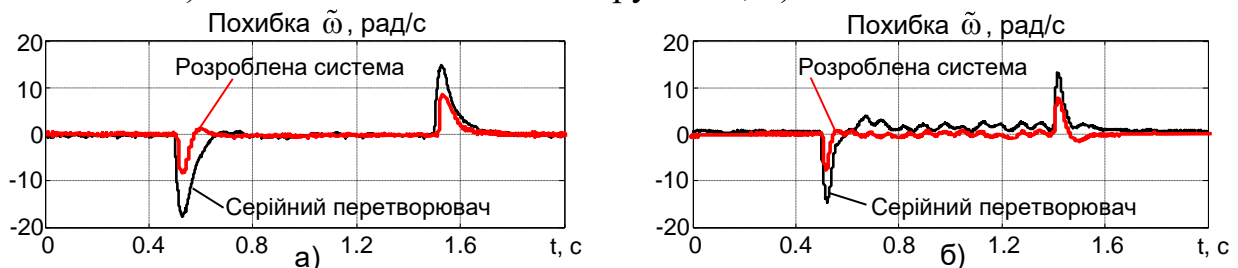


Рис. 5. Експериментальні перехідні процеси при компенсації постійного номінального моменту навантаження: а) $\omega^* = 50$ рад/с; б) $\omega^* = 0$ рад/с

У четвертому розділі проаналізовано вплив нелінійності контуру намагнічування на процеси бездавачевого керування координатами асинхронних двигунів, а також виконано вдосконалення розроблених алгоритмів БВК шляхом врахування насичення магнітної системи, що дозволило підвищити точність оцінювання та відпрацювання кутової швидкості (моменту) в режимах, коли необхідно змінювати амплітуду модуля вектора потокозчеплення ротора.

Для врахування кривої намагнічування використано λ^{-1} модель (Е. Levi, 1995, 1997), яка може бути представлена в формі рівнянь (1), (2), (8) із заміною постійних параметрів L_m , α , β , γ , σ , μ на значення, які залежать від струму намагнічування i_m : $\sigma_m = L_1(i_m) \left[1 - L_m^2(i_m) / (L_1(i_m)L_2(i_m)) \right]$, $\beta_m = L_m(i_m) / [L_2(i_m)\sigma_m]$, $\alpha_m = R_2 / L_2(i_m)$, $\gamma_m = R_1\sigma_m^{-1} + \alpha_m\beta_m L_m(i_m)$, де $L_m(i_m) \triangleq \Psi_m / i_m$ – статична індуктивність контуру намагнічування, $L_1(i_m) = L_m(i_m) + L_{1\sigma}$, $L_2(i_m) = L_m(i_m) + L_{2\sigma}$ – індуктивності статора і ротора; $(L_{1\sigma}, L_{2\sigma}) = \text{const}$ – індуктивності розсіювання статора і ротора $\Psi_m = f(i_m)$ – крива намагнічування. При розгляді λ^{-1} моделі насиченого АД використано рекомендоване Е. Levi припущення про те, що насичується лише контур намагнічування, величиною взаємної індуктивності статора (cross-saturation) можна знехтувати, а також співвідношення між будь-якими парами $L_1(i_m)$, $L_2(i_m)$, $L_m(i_m)$ є постійним. Завдяки останньому припущенню можна вважати, що $\alpha_m L_m(i_m) = \alpha L_m = \text{const}$, $\mu_{1m} = \mu_1 = \text{const}$, $\mu_m = \mu = \text{const}$.

З використанням моделі насиченого АД, вдосконалено алгоритм бездавачевого керування кутовою швидкістю шляхом врахування кривої намагнічування магнітного кола. Методом математичного моделювання та експериментально показано, що неврахування насичення в режимах глибокого ослаблення поля призводить до похибок оцінювання кутової швидкості на рівні 40 – 50 % від номінальної, що унеможливорює використання бездавачевого керування при зміні потокозчеплення ротора. В той же час, при врахуванні кривої намагнічування похибка оцінювання кутової швидкості зменшується до рівня 2-3% в точці найглибшого ослаблення поля, що дозволяє забезпечити високі показники якості регулювання координат АД в режимах ослаблення поля.

Розроблено метод БВК координатами АД з максимізацією співвідношення момент-струм (Maximum Torque Per Ampere – МТРА), який базується на концепції лінеаризації зворотним зв'язком та гарантує асимптотичне відпрацювання заданих гладких траєкторій моменту (кутової швидкості) та максимізацію співвідношення момент-струм статора при роботі АД з постійним, або таким, що повільно змінюється моментом. Структурну схему розробленої системи керування моментом АД з МТРА показано на рис. 6.

Показано, що в загальному випадку задане потокозчеплення в системі з МТРА може формуватися з використанням фільтра

$$\psi^* = \zeta, \dot{\zeta} = \zeta_1, \dot{\zeta}_1 = -k_1 \zeta_1 - k_2 \zeta + k_2 \psi_o(|M|), \quad (29)$$

де $\psi_0(|M|)$ – наперед визначена оптимальна залежність потокозчеплення від заданого моменту, яка забезпечує досягнення умов МТРА, k_1, k_2 – коефіцієнти налаштування фільтра.

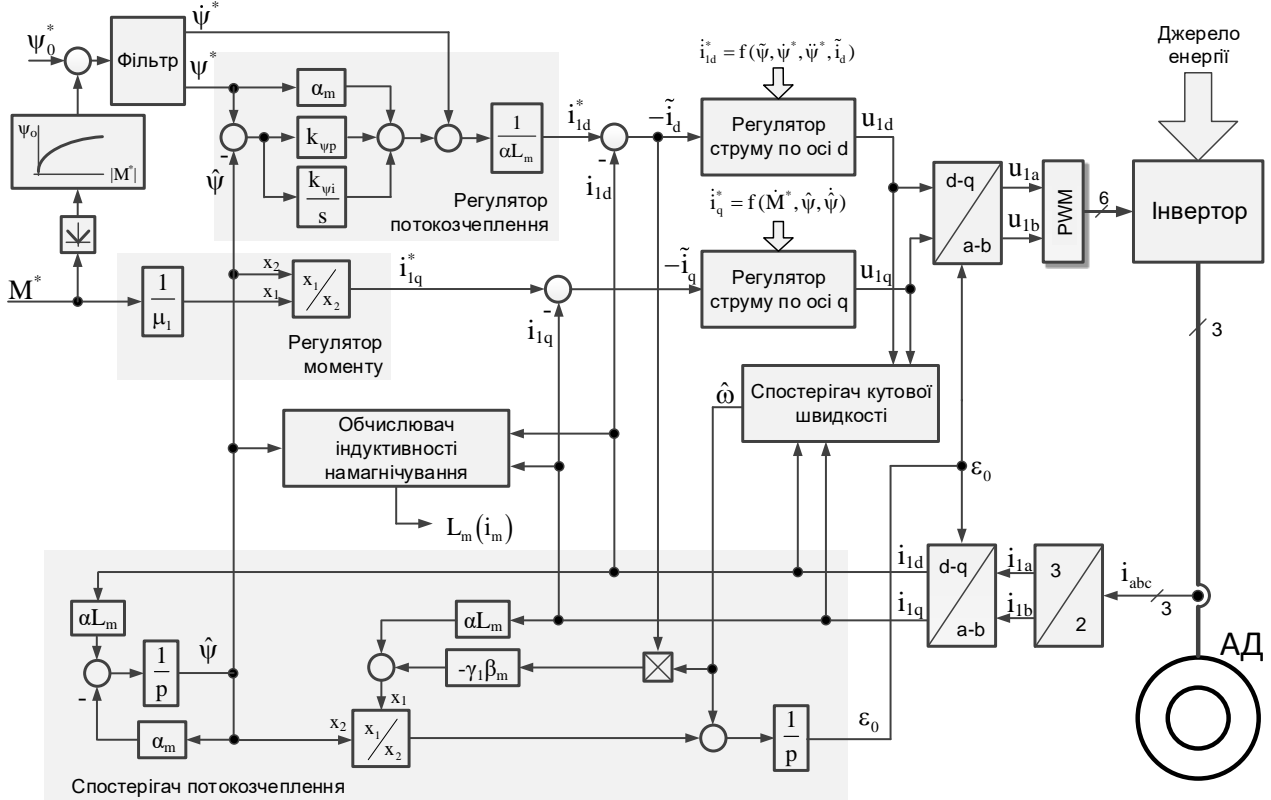


Рис. 6. Структурна схема алгоритму бездавачевого керування з МТРА

Розроблено новий метод формування заданого потокозчеплення ротора у вигляді виходу нелінійного фільтра, один із варіантів якого формується у вигляді

$$\dot{\psi}^* = -\alpha_m \psi^* + 2\alpha L_2 |M^*| / 3\psi^* + \alpha \psi_0^*, \quad (30)$$

де ψ_0^* – мале значення початкового збудження АД для уникнення виродженості при відпрацюванні нульового моменту.

Застосування нелінійного фільтра (30) дозволило досягти максимізації співвідношення момент-струм як в статичних, так і в динамічних режимах відпрацювання заданих траєкторій моменту.

Розроблені структури векторного керування досліджено експериментально з двигунами потужністю від 2.2 кВт до 50 кВт. Під час дослідження систем відпрацювання моменту АД з метою непрямої оцінки показників якості його відпрацювання, швидкість валу двигуна під час моделювання та експерименту стабілізувалася за допомогою векторно-керованого навантажувального АД, з динамічної поведінки координат якого опосередковано визначається динаміка моменту досліджуваного двигуна.

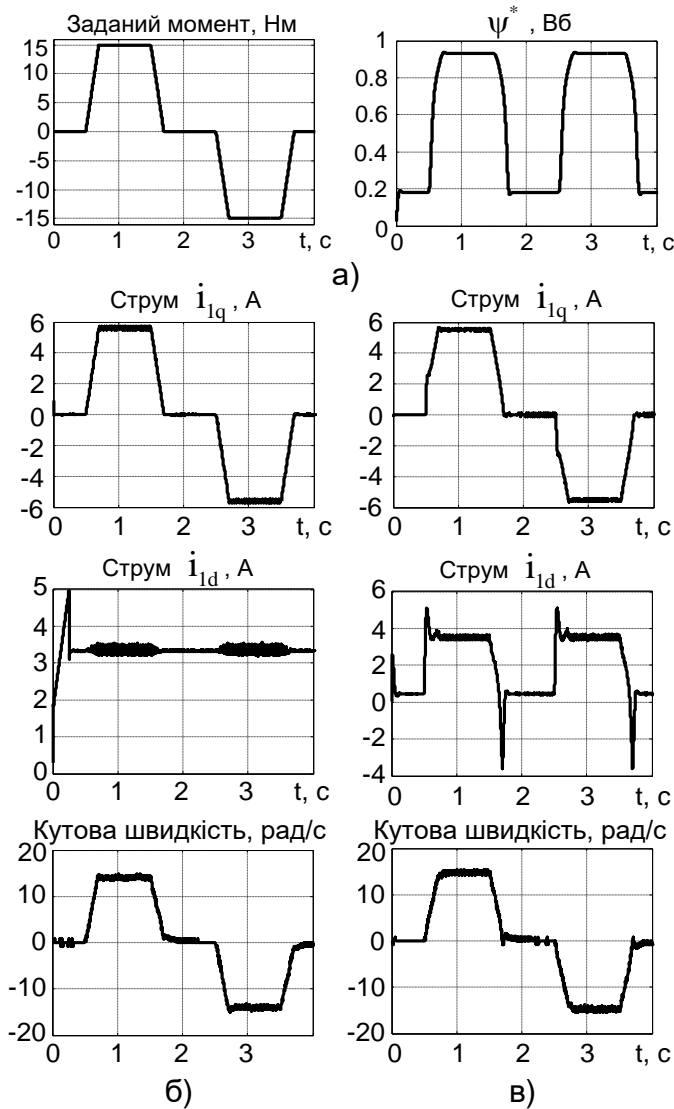


Рис. 7. Перехідні процеси відпрацювання моменту АД: а) задані траєкторії; б) перехідні процеси в системі з постійним потокозчепленням; в) перехідні процеси в системі бездавачевого керування з МТРА

Перехідні процеси в системі векторного керування моментом АД потужністю 2.2 кВт при постійному потокозчепленні з вимірюванням кутової швидкості (ВКПП), а також в системі бездавачевого керування з МТРА (МТРА_{SL}) при відпрацюванні трапецевидної траєкторії заданого моменту показано на рис. 7. З порівняння динамічної поведінки кутової швидкості ротора на рис. 7б та рис. 7в встановлюємо, що вона є однаковою, що опосередковано свідчить про те, що показники якості відпрацювання моменту в системі МТРА_{SL} з достатньою точністю наближені до показників, існуючих в стандартній системі ВКПП.

Для дослідження динамічних процесів струмів статора в системі з МТРА_{SL} при використанні фільтрів (29) та (30) проведено другу серію тестів з використанням заданої траєкторії моменту, яку показано на рис. 8. Дослідження виконано в порівнянні з алгоритмом DFVC_{МТРА} (Direct Flux Vector Control, R.Bojoi, 2013), який визначає один з кращих результатів вирішення задачі керування з МТРА при вимірюванні кутової швидкості.

Обрана траєкторія заданого моменту сформована таким чином,

щоб порівняти динамічну поведінку систем при перетині заданим моментом нуля, а також в усталених режимах з постійними моментами.

На рис. 9 продемонстровано динамічну поведінку алгоритму DFVC_{МТРА} (рис. 9а), а також розробленого алгоритму МТРА_{SL} при формуванні заданого потокозчеплення з використанням фільтру (29) (рис. 9б) та при динамічному формуванні заданого потокозчеплення (30) (рис. 9в). З рис. 9 слідує, що усталені значення струмів для всіх трьох алгоритмів є однаковими. В динаміці алгоритм DFVC_{МТРА} забезпечує більш швидку зміну потокозчеплення, що призводить до значних сплесків струму статора, особливо при перетині моментом нуля, коли потік зменшується до свого мінімального значення.

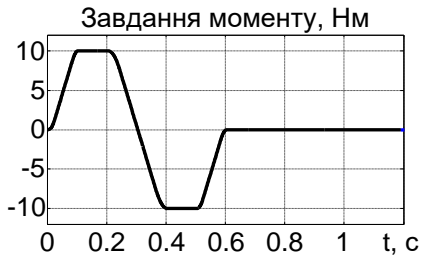


Рис. 8. Задана траєкторія моменту

В розробленому алгоритмі МТРА_{SL} з формуванням завдання потокозчеплення на основі оптимальної залежності $\psi_o(|M|)$ динаміка зміни модуля вектора потокозчеплення визначається налаштуванням фільтра (29), коефіцієнти якого можуть бути налаштовані на необхідну швидкість. Для прикладу, результат, показаний на рис. 9б, отримано при $k_1=130$, і $k_2=4225$, що забезпечує природню частоту власних недемпфованих коливань, рівну 65 рад/с. Якщо збільшити природню частоту до 225 рад/с ($k_1=450$ і $k_2=50625$), то розроблений МТРА_{SL} алгоритм забезпечить динаміку, яка буде подібною до динаміки DFVC_{МТРА} на рис. 9а.

МТРА_{SL} контролер з динамічним формуванням заданого потокозчеплення (30) забезпечує динамічну поведінку, показану на рис. 9в, з якої видно, що та ж сама траєкторія моменту може бути відпрацьована з меншими динамічними струмами статора. Відзначимо, що в цьому випадку сплески струму статора відсутні завдяки повільній зміні потокозчеплення АД.

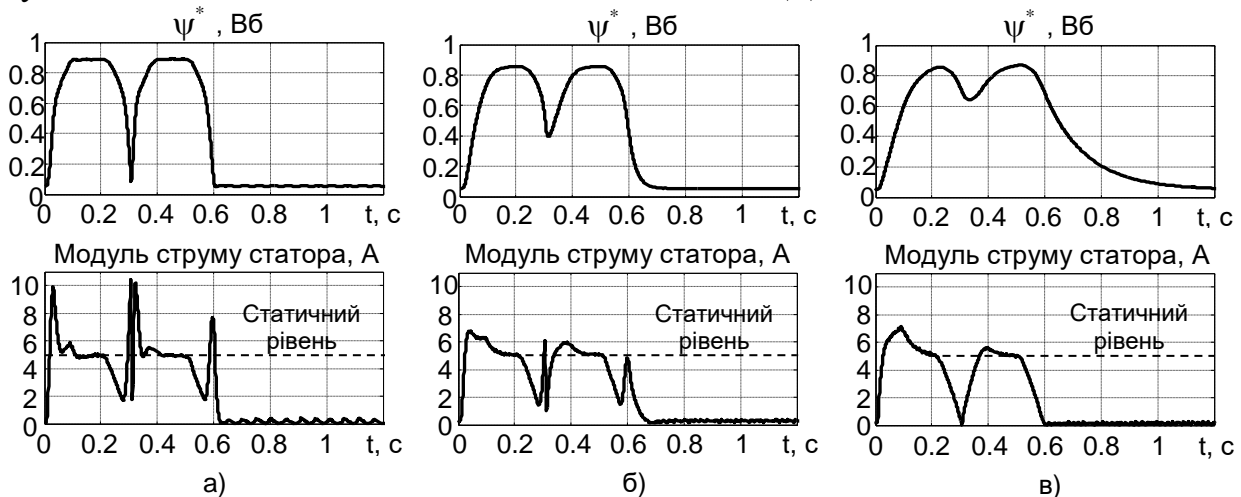


Рис. 9. Перехідні процеси при відпрацюванні гладких заданих траєкторій моменту: а) DFVC_{МТРА}; б) МТРА_{SL} з фільтрованим статичним сигналом завдання; в) МТРА_{SL} з динамічним сигналом завдання

Ефект підвищення струму статора при відпрацюванні синусоїдальної заданої траєкторії моменту проілюстровано частотними характеристиками, показаними на рис. 10. Ці характеристики отримано експериментально з використанням завдання моменту у формі $M^*=M_m \sin(2\pi ft)$ для двох амплітудних значень завдання: $M_{m1}=4$ Нм (27% від номінального) і $M_{m2}=8$ Нм (53% від номінального). Як слідує з графіків рис. 10, відпрацювання більш швидких траєкторій моменту за допомогою алгоритму МТРА_{SL} з формуванням заданого потокозчеплення у відповідності до (30) потребує менших струмів статора на вищих частотах завдання у порівнянні з алгоритмом DFVC_{МТРА}. При виконанні тестів обмеження струму було встановлено на рівні 200% від номінального значення.

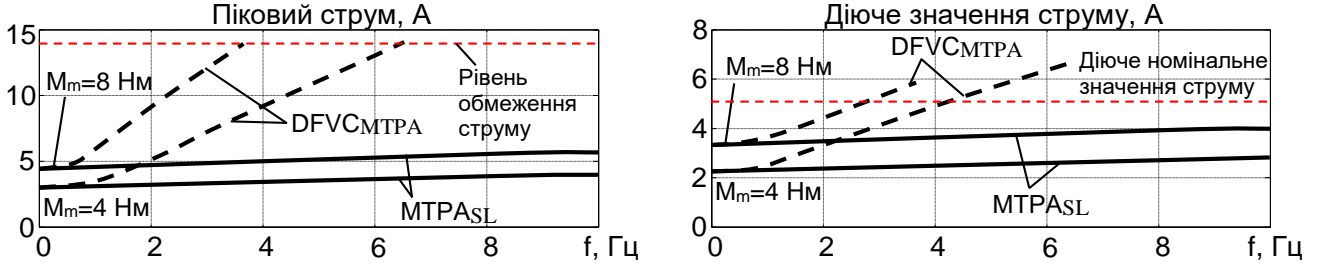


Рис. 10. Експериментальні частотні характеристики $DFVC_{MTPA}$ та $MTPA_{SL}$

У п'ятому розділі вдосконалено систему векторного керування асинхронним генератором. Для цього розроблено метод адаптивного оцінювання струмів статора та потокозчеплень ротора асинхронної машини, який базується на адаптивному спостерігачі загальної форми Матсусе. Доведено, що за умов персистентності збудження синтезована структура коригуючих зворотних зв'язків гарантує локальне експоненційне оцінювання постійної або такої, що повільно змінюється, кутової швидкості та компонент вектора потокозчеплення ротора. Адаптивний спостерігач задається рівняннями

$$\begin{aligned}\dot{\hat{z}}_a &= -R_1 \sigma^{-1} \hat{i}_{1a} + \sigma^{-1} u_{1a} + \alpha \tilde{i}_a - \hat{\omega} \tilde{i}_b, \\ \dot{\hat{z}}_b &= -R_1 \sigma^{-1} \hat{i}_{1b} + \sigma^{-1} u_{1b} + \hat{\omega} \tilde{i}_a + \alpha \tilde{i}_b, \\ \dot{\hat{i}}_{1a} &= -(\gamma + \alpha) \hat{i}_{1a} - \hat{\omega} \hat{i}_{1b} + \alpha \hat{z}_a + \hat{\omega} \hat{z}_b + k_1 \tilde{i}_a + \sigma^{-1} u_{1a}, \\ \dot{\hat{i}}_{1b} &= -(\gamma + \alpha) \hat{i}_{1b} + \hat{\omega} \hat{i}_{1a} + \alpha \hat{z}_b - \hat{\omega} \hat{z}_a + k_1 \tilde{i}_b + \sigma^{-1} u_{1b}, \\ \dot{\hat{\omega}} &= -\tilde{\omega} = \gamma_{\omega} \left[(\hat{z}_b - \hat{i}_{1b}) \tilde{i}_a - (\hat{z}_a - \hat{i}_{1a}) \tilde{i}_b \right],\end{aligned}\quad (31)$$

де $\tilde{i}_a = i_{1a} - \hat{i}_{1a}$, $\tilde{i}_b = i_{1b} - \hat{i}_{1b}$, $(\hat{i}_{1a}, \hat{i}_{1b}, \hat{z}_a, \hat{z}_b)$ – оцінені значення змінних $(i_{1a}, i_{1b}, z_a, z_b)$, $z_a = i_{1a} + \beta \psi_{2a}$, $z_b = i_{1b} + \beta \psi_{2b}$, $\tilde{\omega} = \omega - \hat{\omega}$ – похибка оцінювання кутової швидкості, $k_1 > 0$, $\gamma_{\omega} > 0$ – параметри налаштування.

Показано, що динаміка похибок оцінювання при використанні адаптивного спостерігача (31) має вигляд

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{\mathbf{i}}} &= \mathbf{A}(t) \tilde{\mathbf{i}} + \lambda^T(t) \tilde{\mathbf{z}}, \\ \dot{\tilde{\mathbf{z}}} &= -\lambda(t) \tilde{\mathbf{i}},\end{aligned}\quad (32)$$

де $\tilde{\mathbf{i}} = (\tilde{i}_a, \tilde{i}_b)^T$, $\tilde{\mathbf{z}} = (\tilde{z}_a, \tilde{z}_b, \tilde{\omega})^T$, $\tilde{z}_a = z_a - \hat{z}_a$, $\tilde{z}_b = z_b - \hat{z}_b$,

$$\mathbf{A}(t) = \begin{bmatrix} -k_1 & 0 \\ 0 & -k_1 \end{bmatrix}, \quad \lambda^T(t) = \begin{bmatrix} \alpha & \hat{\omega} & \gamma_{\omega} \zeta_a \\ -\hat{\omega} & \alpha & -\gamma_{\omega} \zeta_b \end{bmatrix}, \quad \zeta_a = \hat{z}_a - \hat{i}_{1a}, \quad \zeta_b = \hat{z}_b - \hat{i}_{1b}.$$

З використанням теореми про персистентність збудження доведено, що положення рівноваги $\mathbf{x} = (\tilde{z}_a, \tilde{z}_b, \tilde{i}_a, \tilde{i}_b, \tilde{\omega}) = 0$ лінеаризованої системи (32) є глобально експоненційно стійким, а відповідно, нелінеаризована система (32) є локально експоненційно стійкою, якщо $\mathbf{A}(t)$ є Гурвіцевою матрицею, а також задоволь-

няються умови персистентності збудження $\int_t^{t+T} \lambda(\tau) \lambda^T(\tau) d\tau > 0 \forall t \geq 0, T > 0$.

На основі синтезованого адаптивного спостерігача з використанням принципу розділення вдосконалено систему БВК напругою ланки постійного струму асинхронного генератора. Розроблена система забезпечує локальне асимптотичне регулювання напруги в ланці постійного струму, а також відпрацювання модуля вектора потокозчеплення ротора без вимірювання кутової швидкості.

Для проведення експериментальних досліджень розробленої системи бездавачевого керування використано послідовність операцій керування, яку показано на рис. 11а.

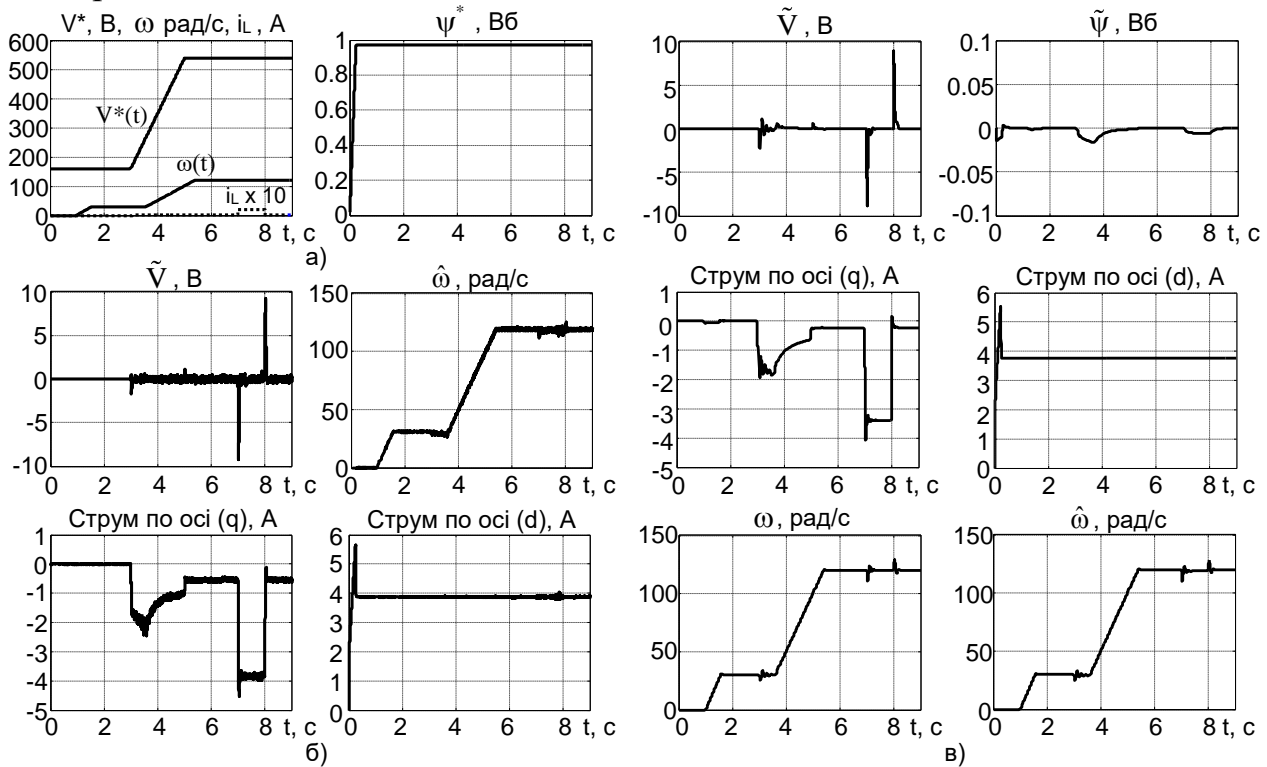


Рис. 11. Перехідні процеси в системі бездавачевого керування асинхронним генератором: а) послідовність операцій керування; б) результати експерименту; в) результати математичного моделювання

На початку тесту кутова швидкість ротора дорівнює нулю, а ємність ланки постійного струму попередньо заряджена від зовнішнього джерела до напруги 160 В; на початку експерименту задане значення напруги дорівнює напрузі ланки постійного струму; на інтервалі часу 0 – 0.25 с відбувається збудження двигуна з використанням заданої траєкторії потокозчеплення; при $t=1$ с первинний рушій розганяє асинхронний генератор до швидкості 30 рад/с; на інтервалі часу 3...5 с задане значення напруги лінійно зростає від 160 до 540 В з першою похідною 460 В/с; на інтервалі часу 3.6...5.4 с швидкість первинного рушія збільшується до значення 120 рад/с; при роботі генератора з постійною швидкістю, на інтервалі часу 7...8 с до ланки постійного струму підключається активне навантаження, що відповідає відбору 1 кВт потужності (60 % від номінального значення). Перехідні процеси в системі генерування енергії при використанні розробленого бездавачевого алгоритму керування модулем вектора

потокосцеплення ротора та напругою ланки постійного струму показано на рис. 11б (експеримент) та рис. 11в (математичне моделювання).

Як слідує з графіків перехідних процесів на рис. 11, розроблена система бездавачевого керування забезпечує асимптотичне регулювання модуля вектора потокосцеплення ротора та напруги ланки постійного струму без вимірювання кутової швидкості асинхронного генератора.

У шостому розділі представлено результати розробки та створення засобів практичної реалізації систем векторного керування асинхронними двигунами.

Створено технологію швидкого прототипного тестування алгоритмів керування асинхронними двигунами, яка включає в себе: сімейство контролерів на основі 32-х розрядних цифрових сигнальних процесорів з плаваючою комою TMS320F28335 та TMS320F28069, ряд дослідних зразків силових перетворювачів потужністю до 240 кВт, розроблене програмне забезпечення для контролерів на основі цифрових сигнальних процесорів, яке в режимі реального часу реалізує синтезовані алгоритми векторного керування координатами АД та функції автоматизації, а також програмне забезпечення для автоматизації досліджень.

З використанням створеної технології швидкого прототипного тестування розроблено та виготовлено експериментальні установки з АД потужністю від 0.75 кВт до 50 кВт, які побудовані за узагальненою функціональною схемою, яку показано на рис. 12. Зовнішній вигляд основних елементів експериментальних установок показано на Рис. 13.

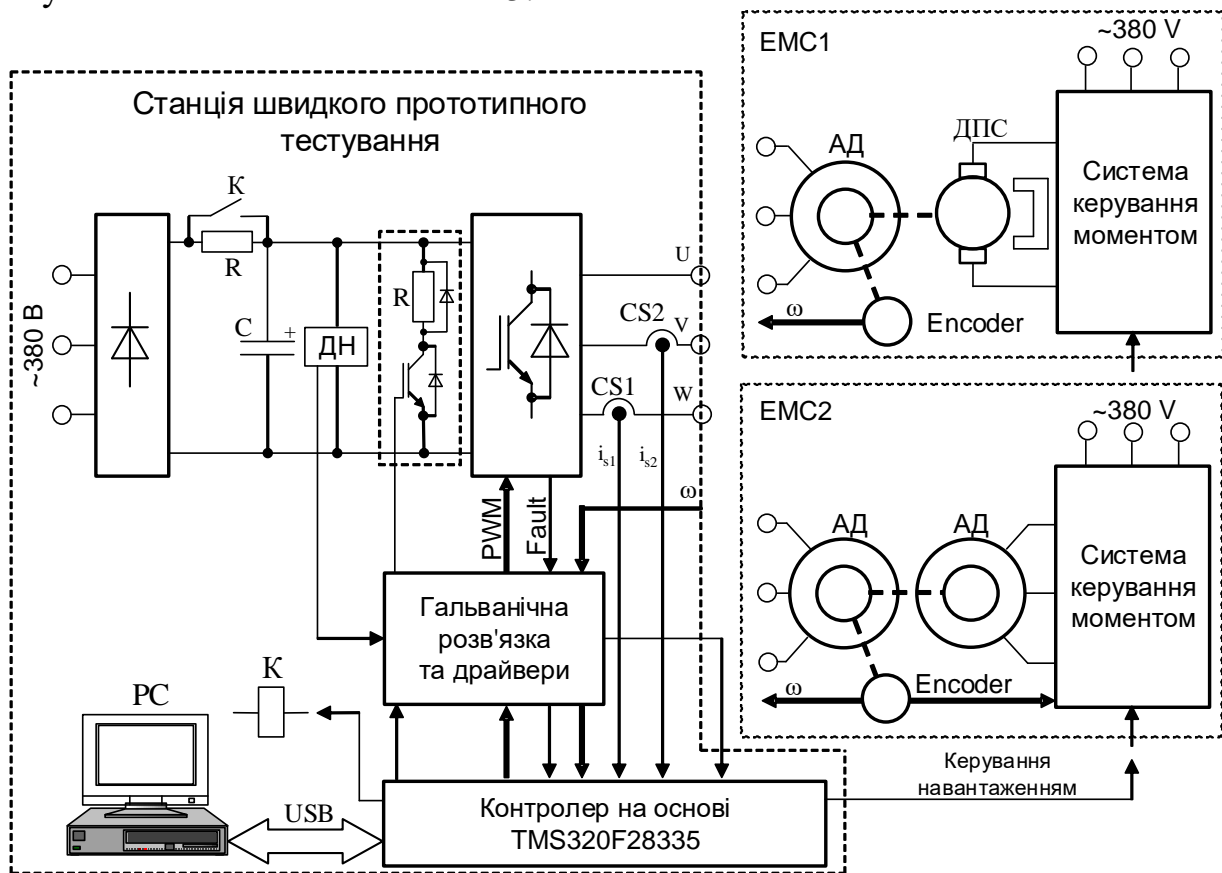
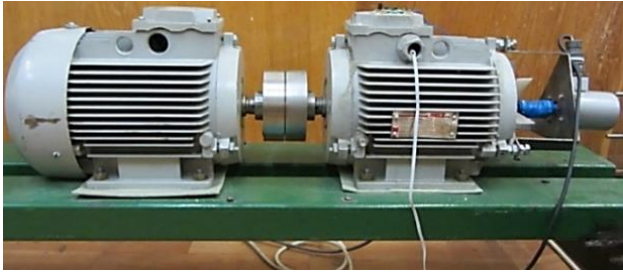
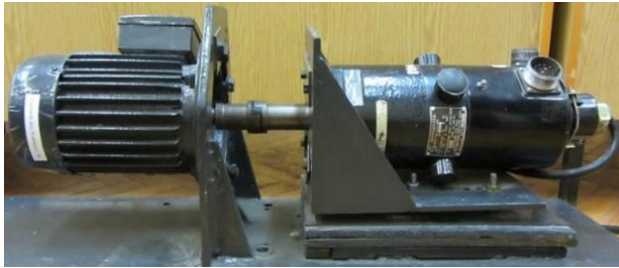


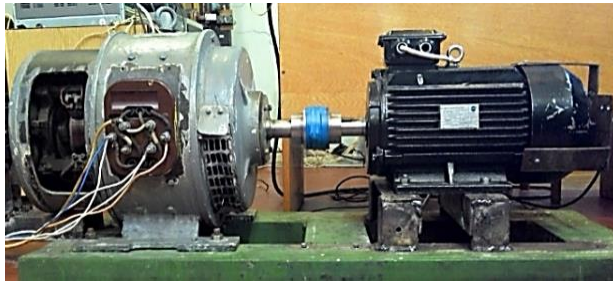
Рис. 12. Функціональна схема типової експериментальної установки



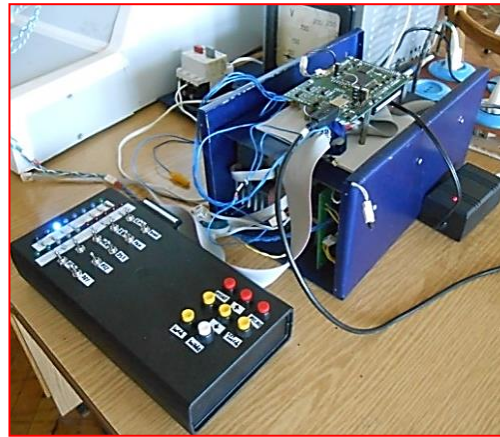
Пара двигунів АД – АД (2.2 кВт)



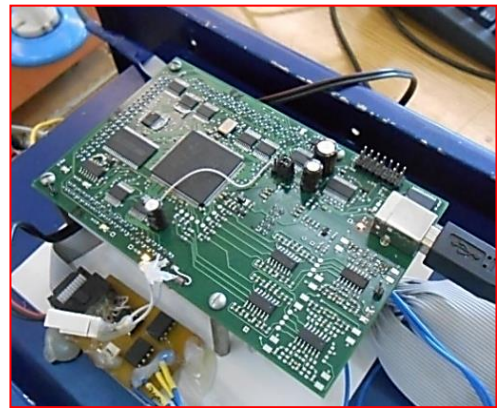
Пара АД (0.75 кВт) – ДПС



Пара АД (5.5 кВт) – ДПС



Силовий перетворювач на базі модуля PM50CLA120



Керуючий контролер на основі TMS320F28335 в складі перетворювача

Рис. 13. Основні елементи експериментальних установок

Створена технологія швидкого прототипного тестування дозволила провести повномасштабні експериментальні дослідження синтезованих структур БВК та підтвердити досягнутий в них високий рівень показників якості керування координатами АД. При цьому, завдяки застосуванню концепції швидкого прототипного тестування час, який необхідно затратити на проведення реального експерименту, наближається до часу, який витрачається на проведення математичного моделювання. Результати експериментальних досліджень розроблених структур векторного керування підтвердили результати математичного моделювання та теоретичні висновки, отримані при виконанні роботи.

Виконано експериментальні дослідження впливу неідеальностей інвертора на процеси керування координатами асинхронних двигунів. Запропоновано вдосконалений метод компенсації мертвого часу інвертора, що дозволило розширити практично досяжний діапазон регулювання кутової швидкості до рівня 1:100 та вище.

Розроблено простий, з точки зору практичної реалізації, алгоритм ідентифікації параметрів електричної частини асинхронного двигуна, який забезпечує асимптотичне оцінювання активного опору ротора, індуктивностей статора і

ротора, а також індуктивності намагнічуючого контуру в системі адаптивного регулювання струмів статора при нерухомому роторі.

Розроблено, виготовлено та виконано експериментальне тестування дослідного зразка тягового електроприводу електробуса потужністю 100 кВт, в якому програмно реалізовано алгоритми енергоефективного векторного керування з максимізацією співвідношення момент-струм, а також типові для електричного транспорту функції автоматизації руху. Силу частину інвертора виготовленого перетворювача, а також зібраний перетворювач показано на рис. 14.

Результати дисертаційної роботи використано при створенні дослідних зразків тягового електроприводу тролейбуса (180 кВт, рис. 15) спільно з ДП «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства», м. Київ, а також в дослідному зразку тягового електроприводу трамвайного вагону (180 кВт) в ПрАТ «Запорізький електроапаратний завод».

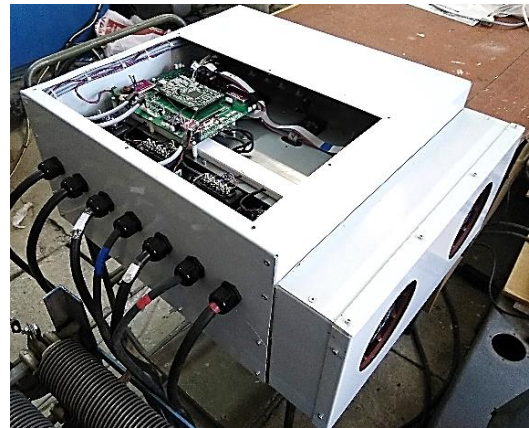
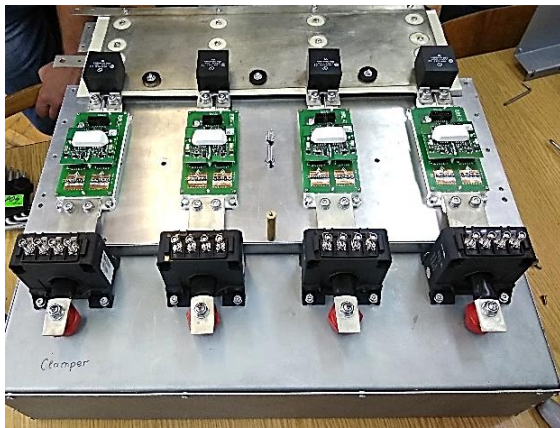


Рис. 14. Дослідний зразок тягового електроприводу електробуса

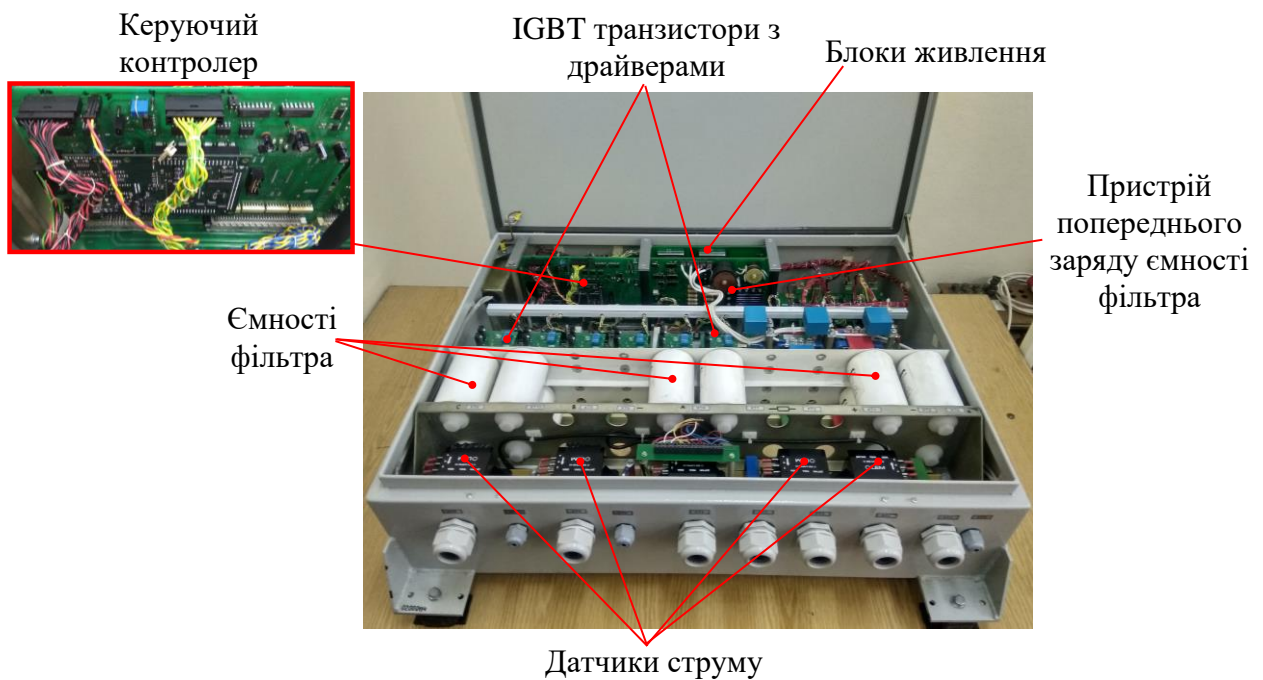


Рис. 15. Дослідний зразок тягового електроприводу тролейбуса

У додатках наведено перелік публікацій автора за темою дисертації, параметри двигунів, які використовувалися під час експериментальних досліджень, акти впровадження та використання результатів роботи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі отримала подальший розвиток теорія аналізу та синтезу електромеханічних систем з векторно-керованими асинхронними двигунами без вимірювання механічних координат. Отримані результати у сукупності є теоретичним узагальненням та новим вирішенням важливої науково-прикладної проблеми створення нових методів бездавачевого векторного керування електромеханічними системами на основі асинхронних двигунів, які дозволяють забезпечити рівень статичних, динамічних та енергетичних характеристик, наближений до існуючих в системах векторного керування з вимірюванням кутової швидкості. Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному.

1. На основі аналізу існуючих методів бездавачевого керування асинхронними двигунами, а також експериментального дослідження існуючих у закордонних виробників систем бездавачевого векторного керування, обґрунтовано доцільність розвитку теорії аналізу та синтезу електромеханічних систем з векторно-керованими асинхронними двигунами без вимірювання механічних координат.

2. Нова концепція прямого векторного керування координатами асинхронних двигунів при неповній інформації про вектор стану та прямому полеорієнтуванні, яка полягає в тому, що за рахунок дії нелінійного контролера результуюча динаміка формується у вигляді декомпозиції на три зв'язані підсистеми «електромагнітну – оцінювання кутової швидкості – механічну» є загальнотеоретичною основою для розробки методів синтезу алгоритмів векторного керування, які забезпечують розв'язання основних задач керування механічними координатами (моментом, кутовою швидкістю) та вектором потокозчеплення ротора в умовах неповної інформації про вектор стану.

3. Розроблений метод синтезу систем прямого векторного керування асинхронними двигунами без вимірювання механічних координат, який полягає у формуванні нелінійного контролера, а також у спеціальному розділенні в часі процесів регулювання струмів і оцінювання кутової швидкості з процесами регулювання потокозчеплення і швидкості формує теоретичний підхід до адаптивного оцінювання змінної у часі кутової швидкості для досягнення асимптотичного відпрацювання заданих траєкторій її змін при дії невідомого моменту навантаження. Відповідно до запропонованого методу асимптотичне оцінювання кутової швидкості та потокозчеплення здійснюється за адаптивним алгоритмом, який синтезовано методами теорії нелінійних сингулярно-вироджених систем.

4. Розроблені методи синтезу та оцінювання дозволили вирішити основні задачі керування координатами електромеханічних систем з асинхронними двигунами, а саме відпрацювання заданих траєкторій модуля вектора потокозчеплення ротора та кутової швидкості (моменту). Синтезовані алгоритми бездавачевого

векторного керування моментом та кутовою швидкістю є строго теоретично обґрунтованими і, на відміну від відомих, не використовують припущення про постійність оцінюваної кутової швидкості. Методом математичного моделювання та експериментально підтверджено, що розроблені алгоритми забезпечують динамічні показники якості керування, які в умовах виконаних експериментальних тестів наближаються до існуючих в системах векторного керування з вимірюванням кутової швидкості. За результатами експериментального тестування встановлено, що розроблена система бездавачевого керування дозволяє забезпечити діапазон регулювання кутової швидкості на рівні 1:100.

5. Розроблена структура повністю розімкненого квазівекторного керування кутовою швидкістю гарантує асимптотичність регулювання кутової швидкості ротора і модуля вектора потокозчеплення статора, а також досягнення умов орієнтації за вектором потокозчеплення статора за умови відсутності навантаження, а в навантаженому стані властивості локальної стійкості в області, яка визначається параметрами асинхронної машини. Структура алгоритму квазівекторного керування надала можливість формування покращених статичних і динамічних характеристик, а також форсування процесів збудження АД при повністю розімкненому керуванні.

6. Розроблений метод адаптивного оцінювання струмів статора та потокозчеплень ротора асинхронної машини за умов персистентності збудження гарантує локальне експоненційне оцінювання постійної кутової швидкості та компонент вектора потокозчеплення ротора на основі інформації про струми та напруги статора.

7. Розроблена структура системи бездавачевого полеорієнтованого векторного керування асинхронним генератором, яка ґрунтується на використанні адаптивного спостерігача потокозчеплення ротора, забезпечує локальне асимптотичне регулювання напруги в ланці постійного струму, а також відпрацювання модуля вектора потокозчеплення ротора.

8. Метод бездавачевого векторного керування моментом та модулем вектора потокозчеплення ротора з максимізацією співвідношення момент-струм, вдосконалений за рахунок врахування кривої намагнічування АД, а також формування заданого потокозчеплення як динамічної функції моменту, дозволив підвищити точність оцінювання кутової швидкості та відпрацювання заданих траєкторій моменту і забезпечити максимізацію співвідношення момент-струм в статичних і динамічних режимах у всьому діапазоні зміни моменту АД. За результатами експериментальних досліджень розробленої системи з АД потужністю 50 кВт встановлено, що за однакових умов тесту застосування МТРА алгоритму дозволило, в порівнянні з класичним керуванням при постійному потокозчепленні, зменшити споживання електричної енергії на 16.5 %. За умови експлуатації одного електричного транспортного засобу, який в день проходить 300 км з енерговитратою 2.5 кВт·год/км, застосування розроблених алгоритмів керування з МТРА дозволить отримати економічний ефект на рівні до 90 тис. грн. на рік.

9. Розвинута в роботі теорія аналізу та синтезу електромеханічних систем з векторно-керованими асинхронними двигунами в умовах неповної інформації до-

зволяє створювати системи бездавачевого векторного керування для широкого ряду промислових механізмів з середнім рівнем вимог до статичних та динамічних показників якості керування. Відсутність давача швидкості в таких системах підвищує їх надійність, а також зменшує їх вартість і витрати на обслуговування. Відмова від давача швидкості дозволяє заощадити в середньому 2.5 тис. грн на кожній електромеханічній системі, кількість введення в експлуатацію яких в Україні обчислюється тисячами на рік.

10. Розроблена технологія швидкого прототипного тестування алгоритмів керування асинхронними двигунами, яка включає в себе пакет моделюючих програм, сімейство контролерів на основі цифрових сигнальних процесорів (TMS320F28335, TMS320F28069), програмне забезпечення для них, яке реалізує алгоритми керування координатами АД та функції автоматизації експериментальних досліджень, а також ряд експериментальних стендів з асинхронними двигунами в діапазоні потужностей від 0.75 до 50 кВт, дозволяє виконувати практичну реалізацію та експериментальні дослідження нових структур керування АД в лабораторних умовах в терміни, які співрозмірні з термінами проведення математичного моделювання.

11. З використанням створеної технології швидкого прототипного тестування проведено повномасштабні експериментальні дослідження всіх розроблених структур керування координатами асинхронних двигунів. Встановлено, що результати експериментальних досліджень в значній мірі повторюють результати математичного моделювання, що підтверджує достовірність теоретичних тверджень роботи.

12. Розроблене програмне забезпечення для контролерів на основі цифрових сигнальних процесорів, яке реалізує функції автоматизації, що є типовими для загальнопромислових електроприводів, а також електромеханічних систем електричних транспортних засобів, дозволило виконати впровадження розроблених структур керування в промисловість та в дослідні зразки тягових електроприводів потужністю до 180 кВт.

13. Розроблені та виготовлені дослідні зразки тягових електроприводів для тролейбусів та електробусів за рахунок реалізації в них вдосконалених методів МТРА керування дозволяють створювати електромеханічні системи електричних транспортних засобів з покращеними динамічними та енергетичними характеристиками.

14. Результати роботи впроваджено: в серійних загальнопромислових асинхронних електроприводах потужністю від 15 до 100 кВт виробництва ТОВ «Енергоресурс»; в дослідному зразку тягового електроприводу потужністю 180 кВт для перспективних моделей тролейбусів та трамвайних вагонів в ДП «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства»; в дослідному зразку тягового електроприводу трамвайного вагону потужністю 180 кВт виробництва ПрАТ «Запорізький електроапаратний завод»; в навчальний процес в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» при викладанні дисциплін «Моделювання електромеханічних систем», «Електромеханічні системи електричних транспортних засобів», «Цифрова обробка сигналів в електромеханічних системах».

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографія

1. Загірняк М.В., Клепіков В.Б., Ковбаса С.М., Михальський В.М., Пересада С.М., Садовой О.В., Шаповал І.А. Энергоефективні електромеханічні системи широкого технологічного призначення. Київ: Інститут електродинаміки НАН України, 2018. 310 с.

Публікації у фахових виданнях:

2. Пересада С. М., Ковбаса С. М. Общетеоретическое решение задачи векторного управления асинхронными двигателями без измерения механических координат. *Технічна електродинаміка*. 2016. №1. С. 26 – 33. (Scopus).

3. Пересада С.М., Ковбаса С.Н., Дымко С.С. Робастифицированное бездатчиковое векторное управление асинхронным двигателем на основе адаптивного наблюдателя пониженного порядка. *Технічна електродинаміка*. 2012. №2. С.81-82. (Scopus).

4. Peresada S., Kovbasa S., Prystupa D., Lyashevskiy S. Adaptive control of stator currents for self-comissioning of induction motor drives. *Технічна електродинаміка*. 2013. №5. С. 24 – 31. (Scopus).

5. Пересада С.М. Ковбаса С.Н., Трандафілов В.Н., Бовкунович В.С. Адаптивное к вариациям активного сопротивления ротора векторное управление асинхронным двигателем на основе нелинейного принципа разделения. *Технічна електродинаміка*. 2015. №1. С. 43–50. (Scopus).

6. Bozhko S., Dymko S., Kovbasa S. and Peresada S. M. "Maximum Torque-per-Amp Control for Traction IM Drives: Theory and Experimental Results," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 1, pp. 181-193, Jan.-Feb. 2017. (Scopus).

7. С. М. Пересада, С. М. Ковбаса, С. С. Димко, В. О. Благодір. Порівняльний аналіз енергетичної ефективності алгоритмів прямого векторного керування моментом асинхронних двигунів з максимізацією співвідношення момент-струм. *Технічна електродинаміка*. 2015. №4. С. 36 – 40. (Scopus).

8. Пересада С. М., Ковбаса С. Н., Онанко А. Ю. Выбор системы полеориентирования при векторном управлении асинхронными двигателями. *Технічна електродинаміка*. 2014. №4. С.102-104. (Scopus).

9. Peresada S., Kovbasa S., Korol S., Zhelinskyi N. Feedback linearizing field-oriented control of induction generator: Theory and experiments. *Технічна електродинаміка*. 2017. №2. С. 48-56. (Scopus).

10. S.Peresada, S. Kovbasa, Y. Nikonenko, S. Bozhko Concept of experimental research for electrical vehicle electromechanical systems with hybrid energy storages. *Технічна електродинаміка*. 2018. №5. С. 57-60. (Scopus).

11. Пересада С. М. Ковбаса С. М., Благодір В. О. Умови персистентності збудження та формування заданого потокозчеплення в системах бездавачевого векторного керування асинхронними двигунами. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал*. Кременчук, 2015. Вип. 4/2015 (32). С. 18–24. (Index Copernicus)

12. Пересада С. М., Ковбаса С. Н., Бовкунович В. С. Грубое векторное управление моментом и потоком асинхронного двигателя. *Технічна електродинаміка*. 2010. №1. С. 60–66.

13. Пересада С. М., Ковбаса С. Н., Бовкунович В.С. Сравнительное экспериментальное тестирование алгоритмов косвенного векторного управления моментом асинхронного двигателя. *Технічна електродинаміка*. 2010. №2. С. 33–40.

14. Пересада С. М., Ковбаса С. Н., Бовкунович В.С. Адаптивный наблюдатель Матсусе: новый синтез, гарантирующий асимптотичность оценивания вектора потокосцепления и активного сопротивления ротора асинхронного двигателя. *Технічна електродинаміка*. 2010. №3. С28 – 32.

15. Пересада С. М., Ковбаса С. Н., Середа А. Н. Аналитическое решение проблемы идентификации параметров асинхронного двигателя. *Вісник національного технічного університету "ХПІ"*. Харків, 2005. Вип. 45. С. 45–49.

16. Пересада С. М., Середа А. Н., Ковбаса С. Н. Экспериментальное тестирование алгоритмов идентификации электрических параметров асинхронных двигателей. *Інформаційний збірник "Промислова електроенергетика та електротехніка"*. 2005. № 3. С. 43–48.

17. Пересада С. М., Болотников А. Ю., Ковбаса С. Н. Основанный на принципе пассивности алгоритм векторного управления асинхронным двигателем при питании со стороны ротора. *Технічна електродинаміка*. 2006. С. 83–88. Темат. вип. «Проблеми сучасної електротехніки».

18. Пересада С. М., Ковбаса С. Н., Крыжановский В. П., Бовкунович В. С. Система управления моментом асинхронного двигателя для тяговых электроприводов. *Інформаційний збірник "Промислова електроенергетика та електротехніка"*. 2007. №1. С. 66 -70.

19. Пересада С. М., Ковбаса С. Н., Болотников А. Ю., Бовкунович В. С. Основанный на принципе пассивности алгоритм отработки момента-потока при косвенной ориентации по вектору потокосцепления статора. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*. Кременчук, 2007. Вип.3/2007, Ч.2. С.35 – 39.

20. Пересада С. М., Ковбаса С.Н., Болотников А.Ю., Крыжановский В.П. Система векторного управления угловой скоростью асинхронной машины двойного питания при использовании сети среднего напряжения. *Інформаційний збірник "Промислова електроенергетика та електротехніка"*. 2007. №6. С. 16 – 18.

21. Пересада С. М., Болотников А.Ю., Ковбаса С.Н., Крижановский В.П. Разработка алгоритмов векторного управления пуском, возбуждением и синхронизацией машины двойного питания и их экспериментальное тестирование. *Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки)*. Дніпродзержинск, 2007. С. 399 – 402.

22. Пересада С. М., Ковбаса С. М., Бовкунович В.С. Управление моментом и потоком асинхронного двигателя без использования информации о токах статора. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені М. Остроградського*. Кременчук, 2008. С. 88 – 92.

23. Пересада С. М., Ковбаса С. М., Бовкунович В.С., Крижановский В.П. Унифицированный контроллер на основе DSP TMS320LF2406A для систем

управления электроприводами. *Інформаційний збірник "Промислова електроенергетика та електротехніка"*. 2008. №4. С. 45 – 49.

24. Пересада С. М., Ковбаса С. М., Бовкунович В.С. Адаптивное оценивание вектора потокосцепления асинхронного двигателя при неизвестных сопротивлениях статора и ротора. *Вісник національного технічного університету "ХПІ"*. Харків, 2008. №30. С. 64–68.

25. Пересада С. М., Ковбаса С. М., Бовкунович В.С. Сравнительное тестирование алгоритмов векторного и частотного управления моментом асинхронного двигателя в электромеханических системах пассажирского электротранспорта. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені М. Остроградського*. Кременчук, 2009. Вип. 4/2009. Ч. 1. С. 13 – 16.

26. Пересада С. М., Ковбаса С. Н., Бовкунович В.С. Экспериментальное тестирование адаптивного к вариациям активного сопротивления роторной цепи наблюдателя потокосцепления асинхронного двигателя. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. Київ, 2010. №25. С. 68 – 71.

27. Пересада С. М., Ковбаса С. Н., Малько М.П. Робастный алгоритм идентификации параметров асинхронного двигателя при неподвижном роторе. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені М. Остроградського*. Кременчук, 2010. № 1. С. 121 – 125.

28. Peresada S., Kovbasa S., Dymko S. Indirect field-oriented torque control of induction motors with maximum torque per amper ratio. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені М. Остроградського*. Кременчук, 2010. № 2. С. 33-36.

29. Пересада С.М., Ковбаса С.Н., Глушков В. А., Бовкунович В.С., Повышение эффективности векторно-управляемых электроприводов за счет робастификации и адаптации к вариациям активного сопротивления ротора. *Інформаційний збірник "Промислова електроенергетика та електротехніка"*. 2010. №5. С. 49-55.

30. Пересада С. М., Дымко С. С., Ковбаса С. М. Обобщенное решение задачи косвенного векторного управления моментом асинхронных двигателей с максимизацией соотношения момент-ток в статике. *Вісник національного технічного університету "ХПІ"*. Харків, 2010. Вип. 28. С. 39–42.

31. Пересада С. М., Ковбаса С. М. Робастифицированное векторное бездатчиковое управление угловой скоростью асинхронного двигателя на основе адаптивного наблюдателя пониженного порядка. *Вісник національного технічного університету "ХПІ"*. Харків, 2010. Вип. 28. С. 110–114.

32. Пересада С. М., Ковбаса С. Н., Онанко А. Ю. Обобщенный алгоритм частотного управления асинхронными двигателями. Часть 1: синтез на основе второго метода Ляпунова. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Кременчук, 2011. Вип. 2/2011 (14). С. 13 – 16.

33. Пересада С. М., Ковбаса С. Н., Онанко А. Ю. Обобщенный алгоритм частотного управления асинхронными двигателями. Часть 2: результаты тестирования. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Кременчук, 2011. Вип. 2/2011 (14). С. 17 – 21.

34. Пересада С. М., Ковбаса С. Н., Онанко А. Ю. Семейство алгоритмов обработки момента-потока асинхронного двигателя при косвенной ориентации по вектору потокосцепления статора. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. Одеса, 2011. №03 (79). С. 25 – 27.

35. Пересада С. М., Ковбаса С. М. Векторне бездатчикове керування моментом асинхронного двигуна з орієнтацією за вектором потокосцеплення статора. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. Вінниця, 2012. №1. С 93 – 97.

36. С. М. Пересада, С. Н. Ковбаса, Д. Л. Приступа. Идентификация электрических параметров асинхронного двигателя на основе адаптивного наблюдателя полного порядка. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Кременчук, 2012. №4(20). С. 10 – 13.

37. Пересада С.М., С. Н. Ковбаса, А. Б. Воронко, Д. Л. Приступа Сравнительное экспериментальное тестирование систем бездатчикового управления асинхронными двигателями. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Кременчук, 2012. Вип.3/2012 (19). С. 137 – 141.

38. Ковбаса С. М., Воронко А. Б. Высокопроизводительный унифицированный контролер на основе DSP TMS320F28335 для электромеханических систем. *Вісник національного технічного університету "ХПІ"*. Харків, 2013. №36 (1009). С. 293 – 295.

39. S. Peresada, S. Lyshevsky, S. Kovbasa and M. Konoplinsky Identification Of Stator And Rotor Resistances Of Induction Motors. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. Одеса, 2013. Vol. 09(85). С. 7 – 15.

40. S. Peresada, S. Kovbasa, D. Prystupa Adaptive Stator Current Regulation for Identification of Induction Motor Parameter. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Кременчук, 2013. Vol. 2/2013 (22). С. 10 – 16.

41. С. М. Пересада, С. Н. Ковбаса, Д. Л. Приступа Алгоритм идентификации электрических параметров асинхронного двигателя на основе адаптивного наблюдателя полного порядка: синтез и экспериментальное тестирование. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. Київ, 2013. №34. С.27 – 34.

42. Пересада С. М. Ковбаса С. М., Алисов А. С. Общетеоретическое решение задачи управления механическими координатами электромеханических систем без измерения токов приводных двигателей. *Вісник національного технічного університету "ХПІ"*. Харків, 2013. №36 (1009). С. 31–35.

43. С. М. Пересада, С. Н. Ковбаса, А. Б. Воронко Экспериментальное исследование статических и динамических характеристик алгоритмов регулирования момента для тяговых асинхронных электроприводов. *Наукові праці Вінницького національного технічного інституту*. Вінниця, 2013. № 4. С. 1 – 4.

44. Пересада С. М. Ковбаса С. Н., Благодир В. О., Дынник Т. В. Экспериментальное тестирование адаптивного наблюдателя параметров сети питания. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. Київ, 2014. № 37. С. 91–93.

45. Пересада С. М., Ковбаса С. Н., Трандафилов В. Н. Инвариантный к вариациям активного сопротивления ротора алгоритм прямого векторного управления асинхронными двигателями при питании от источника тока. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал*. Кременчук, 2014. Вип. 3/2014 (27). С. 10–19.

46. Peresada S., Kovbasa S., Pristupa D., Pushnitsyn D., Nikonenko Y. Nonlinear control of voltage source AC-DC and DC-DC boost converters. *Вісник національного технічного університету "ХПІ"*. Харків, 2017. Вип. 27 (1249). С.84-88.

47. Пересада С. М., Ковбаса С. М., Желінський М. М. Експериментальне тестування системи робастного векторного керування асинхронним генератором, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. Вінниця, 2018. № 3(138). С.62-68.

48. Пересада С. М., Ковбаса С. Н., Дымко С. С. Формирование заданного потокосцепления для алгоритмов векторного управления асинхронными двигателями с максимизацией соотношения момент-ток». *Вісник національного технічного університету "ХПІ"*. Харків, 2017. Вип. 27 (1249). С.43-47.

49. Ковбаса С. М., Пушніцина І. І. Дослідження впливу кривої намагнічування асинхронного двигуна на показники якості системи бездавачевого векторного керування. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка*. Харків, 2018. Вип. 195. С.127-129.

50. Ковбаса С. М., Дученко А. Ю. Аналіз впливу кривої намагнічування на процеси ослаблення поля в асинхронних векторно-керованих електроприводах, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. Вінниця, 2017. №6. С. 60-65.

Матеріали конференцій:

51. Peresada S., Kovbasa S., Prystupa D. and Lyshevski S. E. "Identification of induction motor parameters adaptively controlling stator currents," IECON – 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Vienna, 2013, pp. 8476-8481.

52. Peresada S., Kovbasa S. and Prystupa D. "Adaptive observers for self commissioning of induction motor drives: Theory and experiment," 2014 IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Kiev, 2014, pp. 240-245.

53. Peresada S., Kovbasa S., Prystupa D. and Lyshevski S. E. "Identification of induction motor parameters for self-commissioning procedure: A new algorithm and experimental verification," 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Istanbul, 2014, pp. 818-823.

54. Peresada S., Kovbasa S., Trandafilov V. and Pyzhov V. "Sliding mode observer based control of induction motors: Experimental study," 2014 IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Kiev, 2014, pp. 261-265.

55. Bozhko S., Dymko S., Kovbasa S. and Peresada S. "MTA control for traction IM drives: Theory and experimental results," 2015 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS), Aachen, 2015, pp. 1-6.

56. Peresada S., Kovbasa S., Dymko S. and Bozhko S. "Dynamic output feedback linearizing control of saturated induction motors with torque per Ampere ratio maximization," 2016 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Kiev, 2016, pp. 1-6.

57. Peresada S., Kovbasa S., Korol S., Pechenik N. and Zhelinskyi N. "Indirect field oriented output feedback linearized control of induction generator," 2016 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Kiev, 2016, pp. 1-5.

58. Bozhko S., Peresada S., Kovbasa S. and Zhelinskyi M. "Robust indirect field oriented control of induction generator," 2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), Toulouse, 2016, pp. 1-6.
59. Peresada S., Kovbasa S., Pushnitsyn D. and Zaichenko Y., "Two nonlinear controllers for voltage source AC-DC converter," 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Kiev, 2017, pp. 462-467.
60. Peresada S., Kovbasa S., Zhelinskyi M. and Duchenko A., "Speed sensorless direct field oriented control of induction generator," 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Kiev, 2017, pp. 548-553.
61. Peresada S., Kovbasa S., Dymko S. and Bozhko S., "Maximum torque-per-amp tracking control of saturated induction motors," 2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, 2017, pp. 72-75.
62. Bozhko S., Kovbasa S., Nikonenko Y. and Peresada S., "Direct vector control of induction motors based on rotor resistance-invariant rotor flux observer," 2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), Nottingham, 2018, pp. 1-6.
63. S. Peresada, M. Zhelinskyi, S. Kovbasa and S. Korol, "Indirect Field Oriented Control of The Saturated Induction Generators with Linear PI Regulators," 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 2019, pp. 138-143.
64. S. Peresada, Y. Nikonenko, S. Kovbasa, A. Kuznietsov and D. Pushnitsyn, "Rapid Prototyping Station for Batteries-Supercapacitors Hybrid Energy Storage Systems," 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2019, pp. 826-831.

АНОТАЦІЯ

Ковбаса С. М. Розвиток теорії бездавачевого векторного керування електромеханічними системами з асинхронними двигунами. На правах рукопису

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2020.

У дисертаційній роботі вирішується важлива науково-прикладна проблема створення нових методів бездавачевого векторного керування електромеханічними системами на основі асинхронних двигунів, які дозволяють забезпечити рівень статичних та динамічних характеристик, наближений до існуючих в системах векторного керування з вимірюванням кутової швидкості.

Розроблено нову концепцію та метод синтезу прямого векторного керування координатами асинхронних двигунів без вимірювання механічних координат, які є теоретичним підґрунтям для вирішення задач асимптотичного відпрацювання кутової швидкості (моменту) та модуля вектора потокозчеплення ротора при одночасному асимптотичному полеорієнтуванні.

Розроблено метод адаптивного оцінювання кутової швидкості та потокозчеплення ротора асинхронної машини. Вдосконалено метод прямого полеорієнтованого векторного керування асинхронним генератором, завдяки чому забезпечується асимптотичне регулювання напруги в ланці постійного струму та модуля вектора потокозчеплення ротора без вимірювання кутової швидкості.

Вдосконалено метод бездавачевого векторного керування моментом з максимізацією співвідношення момент-струм шляхом врахування насичення магнітної системи двигуна, а також формування заданого потокозчеплення як динамічної функції моменту, що вперше забезпечило його асимптотичне відпрацювання як в статиці, так і в динаміці в усьому діапазоні зміни моменту.

Ключові слова: бездавачеве векторне керування, асинхронний двигун, спостерігач кутової швидкості, електромеханічна система.

АННОТАЦИЯ

Ковбаса С. Н. Развитие теории бездатчикового векторного управления электромеханическими системами с асинхронными двигателями. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» МОН Украины, Киев, 2020.

В диссертационной работе решается важная научно-прикладная проблема создания новых методов бездатчикового векторного управления электромеханическими системами на основе асинхронных двигателей, которые позволяют обеспечить уровень статических и динамических характеристик, приближенный к существующим в системах векторного управления с измерением угловой скорости.

Разработана новая концепция и метод синтеза прямого векторного управления координатами асинхронных двигателей без измерения механических координат, которые являются теоретической базой для решения задач асимптотической отработки угловой скорости (момента) и модуля вектора потокозчепления ротора при одновременном асимптотическом полеориентировании.

Разработан метод адаптивного оценивания угловой скорости и потокозчеплений ротора асинхронной машины. Усовершенствован метод прямого полеориентированного векторного управления асинхронным генератором, благодаря чему обеспечено асимптотическое регулирование напряжения в звене постоянного тока и модуля вектора потокозчепления ротора без измерения угловой скорости.

Усовершенствован метод бездатчикового векторного управления моментом с максимизацией соотношения момент-ток путем учета насыщения магнитной системы двигателя, а также формирования заданного потокозчепления как динамической функции момента, что впервые обеспечило его асимптотическую отработку как в статике, так и в динамике во всем диапазоне изменения момента.

Ключевые слова: бездатчиковое векторное управление, асинхронный двигатель, наблюдатель угловой скорости, электромеханическая система.

ABSTRACT

Kovbasa S. M. Development of the theory of sensorless vector control of electromechanical systems with induction motors. – Manuscript.

Thesis for a Doctor of Sciences degree of electrical engineering of speciality 05.09.03 – electrotechnical complexes and systems. – National technical university of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute”, Kyiv, 2020.

In the dissertation developed a new solution of an important scientific and applied problem of creating new methods of sensorless vector control for electromechanical systems with induction motors (IM), which allow to provide the same with the sensed systems level of control performances.

Based on the second Lyapunov method, the quasi-vector speed control algorithm is synthesized. Developed algorithm guarantees the asymptotic regulation of the rotor speed and the stator flux vector, as well as achieving of the asymptotic stator flux orientation under no-load operation condition. In the loaded state, the system remains locally stable in the stability region, which is defined by the values of the IM parameters. The structure of the developed quasi-vector control algorithm provide possibility to form the improved static characteristics and to force the excitation of the IM during fully open control. For the systems with higher requirements for dynamic performances, a modified quasi-vector control is developed.

A new concept of sensorless direct field oriented vector control of induction motor is developed. Developed concept form a theoretical background for the development of control algorithm synthesis methods. The main concept idea consist in the following: due to the nonlinear controller action, system's errors dynamics is formed as the decomposition of the original electromechanical object structure into three interconnected subsystems, whose stability and robustness properties provide for the composite system properties of the local exponential stability.

A new method of sensorless control synthesis for IM is developed. According to the proposed method the nonlinear controllers forms a resulting system's structure in the form of nonlinearly coupled subsystems: adaptive speed estimation, mechanical and electromagnetic subsystem with properties of exponential stability under persistancy of excitation conditions. Subsystems stability properties together with hierarchical time-scale dynamic separation guarantees for closed-loop composite system local exponential stability properties. As a result, robust to inverter nonidealities asymptotic speed-flux trajectory tracking together with asymptotic rotor flux orientation and speed-flux estimation is achieved.

Using the proposed method, the speed sensorless vector control algorithm is developed. Control algorithm is based on adaptive speed estimation and is rigorously theoretically justified. Proposed nonlinear controller guarantees asymptotic speed-flux trajectory tracking together with asymptotic rotor flux orientation, flux and variable speed estimation.

Using concept of direct rotor and stator field orientation, speed sensorless torque-flux vector control algorithms are developed. Proposed control structures provides

asymptotic torque-flux tracking together with asymptotic field orientation, asymptotic flux and variable speed estimation.

The speed sensorless vector control algorithm of induction motor with torque per Ampere ratio maximization is developed. Control algorithm is based on the feedback linearization technique and guarantees asymptotic tracking of smooth torque (speed) trajectories together with torque per Ampere ratio maximization for constant or slowly varying torque references. A method of the flux reference calculation in the form of a dynamic torque function is developed. Proposed flux reference calculator provide maximization of the torque per Ampere ratio in both constant and variable torque operation conditions.

The adaptive observer of induction motor stator currents and rotor fluxes is developed. Proposed observer under persistency of excitation conditions provides asymptotical estimation of constant or slowly varying rotor speed and rotor flux vector components. Using developed adaptive observer and nonlinear separation principle direct field oriented vector control of induction generator is improved. Improved control algorithm provides local asymptotic flux and DC-link voltage regulation without direct speed measurement.

The technology of induction motor control algorithms rapid prototyping is developed. This technology includes: a family of controllers based on 32-bit floating-point digital signal processors TMS320F28335 and TMS320F28069; a number of manufactured experimental power converters; real-time software implementation of developed control algorithms for digital signal processor based controllers; designed and manufactured experimental rigs with induction motors in the power range from 0.75 kW to 50 kW. The created technology of rapid prototyping allow to carry out full-scale experimental investigations of the developed sensorless control structures.

Results of experimental investigations confirms high performances of induction motor control in the electromechanical systems with developed sensorless control algorithms. Experimental studies of the inverter nonidealities influence on the induction motor control is performed. An advanced algorithm of inverter dead time compensation has been proposed. It is shown experimentally, that proposed compensation algorithm in the developed speed sensorless control scheme provide speed regulation range extension to the level 1:100. Induction motor parameters identification algorithm is developed and experimentally verified.

Industrial prototypes of the traction drives with rated power up to 180 kW for electric vehicles are developed, manufactured end experimentally tested.

Keywords: sensorless vector control, induction motor, speed observer, electro-mechanical system.